

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE POTABILIZACIÓN A BAJO COSTO EN
COMUNIDADES PALAFÍTICAS EN EL CARIBE NORTE COLOMBIANO**

JOSE LUIS LUGO ARIAS

UNIVERSIDAD DEL NORTE

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2017



**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE POTABILIZACIÓN A BAJO COSTO EN
COMUNIDADES PALAFÍTICAS EN EL CARIBE NORTE COLOMBIANO**

JOSE LUIS LUGO ARIAS

**Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería
Ambiental**

DR. -ING. CARLOS PACHECO BUSTOS

(Director)

UNIVERSIDAD DEL NORTE

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2017



NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

FIRMA

JURADO 2

FIRMA

DEDICATORIA

“A mi padre (Q.E.P.D.) y a mi madre por ser los seres que
me apoyan incondicionalmente en mi proyecto de vida para mejorar como
persona”

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Norte por la excelente formación que me brindo en todo el proceso de aprendizaje.

A mi hermano mayor que me apoyo en todo lo necesario para ejecutar actividades importantes del proyecto.

Al director del proyecto por mostrar siempre su motivación y preocuparse porque se lograrán los objetivos propuestos de este importante trabajo.

A los ingenieros: María Clara Díaz, Ángela Sierra, David Macías y Ricardo Lagares por colaborarme en el suministro de información y en actividades planteadas en el proyecto.

A Colciencias y a la Gobernación del Magdalena por financiar esta investigación y mi estudio de postgrado.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. ANTECEDENTES	8
4.1 Coagulantes naturales	8
4.2 Procesos de filtración a bajo costo en la potabilización de agua (filtro lento de arena y de carbón activado)	14
4.3 Desinfección a bajo costo (SODIS y lámparas UV)	19
4.4 Procesos combinados de potabilización a bajo costo.....	22
5. OBJETIVOS	25
5.1 General	25
5.2 Específicos	25
6. MARCO TEÓRICO	26
6.1 Calidad del agua	26
6.2 Tratamiento no convencional de agua potable a bajo costo	27
6.2.1 Coagulación y coagulantes naturales	27
6.2.2 Sedimentación	29
6.2.3 Filtración	29
6.2.4 Desinfección	32
7. METODOLOGÍA	34

7.1	Área de estudio	34
7.2	Diseño metodológico.....	35
7.2.1	Evaluación de la calidad del agua	35
7.2.2	Determinación de coagulantes naturales locales para el proceso de coagulación.....	37
7.2.3	Determinación de alternativas a bajo costo de procesos de filtración y/o desinfección	40
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	45
8.1	Etapa 1: Evaluación de la calidad del agua	45
8.1.1	Encuesta aplicada a los habitantes de los dos pueblos palafíticos	47
8.2	Etapa 2: Determinación de coagulantes naturales locales para el proceso de coagulación.....	50
8.3	Etapa 3: Determinación de alternativas a bajo costo de procesos de filtración y/o desinfección.....	55
8.3.1	Eficiencia de los filtros empleados (bioarena y carbón activado).....	55
8.3.2	Eficiencia de los dos procesos de desinfección usados (Lámpara UV y SODIS)68	
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
10.	REFERENCIAS.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en laboratorio	36
Tabla 2. Cantidad de pruebas realizadas en laboratorio de la investigación	43
Tabla 3. Parámetros evaluados de la calidad de agua en la fuente de agua y sitio de distribución de agua de los palafíticos.....	45
Tabla 4. Percepción y gestión del agua de consumo de los habitantes de los pueblos palafíticos, en porcentaje (%).	48
Tabla 5. Datos medidos de los parámetros de calidad de agua después de la filtración vs la muestra inicial (agua cruda)	55
Tabla 6. Análisis descriptivo de los parámetros de calidad de agua medidos después de la filtración	56
Tabla 7. Valores de referencia para la eficiencia de la combinación coagulante-tipo de filtro	59
Tabla 8. Resultados de la comparación entre filtros y combinaciones entre filtros y coagulantes del promedio o mediana de los parámetros evaluados considerados más importantes.....	67
Tabla 9. Coliformes totales y fecales después de la filtración vs la muestra de agua filtrada	68
Tabla 10. Resultados de la comparación de los dos indicadores evaluados (después de la desinfección) entre las dos técnicas de desinfección empleadas.....	72
Tabla 11. Puntajes de riesgo para el cálculo del IRCA definido en la Resolución 2115/2007	73
Tabla 12. Estimación del IRCA con los parámetros de calidad de agua analizados en las pruebas de laboratorio	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bongoductos de transporte de agua en los pueblos palafíticos de la CGCM. Fuente: tomada por el autor	6
Figura 2. Vivienda con tanques de almacenamiento de agua. Fuente: Tomada por el autor	7
Figura 3. Componentes de un filtro de bioarena. Fuente: CAWST, 2009.....	30
Figura 4. Pasos del método de barreras múltiples. Fuente: (CAWST, 2009)	31
Figura 5. Área de estudio: Ubicación de pueblos palafíticos y las rutas de ingreso de agua potable en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Fuente: Modificado Google Earth.....	35
Figura 6. Prueba de coagulación. (a) Muestras de agua antes de aplicar los coagulantes. (b) Muestras después de aplicar el coagulante cumplido el tiempo de sedimentación; en la Hilera A, usando Moringa, y en la Hilera B, Cañandonga ...	38
Figura 7. Esquema del proceso de obtención de coagulantes	39
Figura 8. Filtro de bioarena.....	40
Figura 9. Filtro de carbón activado	41
Figura 10. Dispositivo de radiación UV.....	42
Figura 11. Diagrama de la metodología empleada para la potabilización no convencional	44
Figura 12. Variación de la turbiedad y color en el tiempo de sedimentación de los coagulantes empleados. (a) Turbiedad en la primera prueba de laboratorio. (b) Turbiedad en la segunda prueba. (c) Color en la primera prueba. (d) Color en la segunda prueba.	51
Figura 13. Remoción de turbiedad (%) Vs condiciones de los coagulantes empleados.....	52
Figura 14. Remoción de color (%) Vs condiciones de los coagulantes empleados	53
Figura 15. Variación del pH después de la filtración.....	58
Figura 16. Variación de la turbiedad después de la filtración	60
Figura 17. Remoción de la turbiedad después de la filtración- [FB]: Filtro de bioarena, [FCA]: Filro de carbón activado	61

Figura 18. Variación del color después de la filtración	62
Figura 19. Remoción del color después de la filtración	62
Figura 20. Variación de la dureza total después de la filtración.....	63
Figura 21. Remoción de la dureza total después de la filtración	63
Figura 22. Variación de los coliformes totales después de la filtración.....	64
Figura 23. Remoción de Coliformes totales después de la filtración	65
Figura 24. Variación de los coliformes fecales después de la filtración	65
Figura 25. Remoción de Coliformes fecales después de la filtración	66
Figura 26. Variación de los coliformes totales después de la desinfección (salida de agua)	70
Figura 27. Remoción de Coliformes totales después de la desinfección.....	70
Figura 28. Variación de los coliformes fecales después de la desinfección (salida de agua)	71
Figura 29. Remoción de Coliformes fecales después de la desinfección	71
Figura 30. Gráfico de comparación de medias entre SODIS y radiación UV	72

RESUMEN

El agua de buena calidad para consumo humano es fundamental para prevenir y evitar transmisiones de enfermedades gastrointestinales, ya que un agua contaminada puede contener sustancias químicas, microorganismos, residuos de animales o de personas, que ponen en riesgo la salud de las personas. Este es uno de los temas que a nivel mundial más ha trabajado la Organización Mundial de la Salud (OMS) y por ende la importancia de desarrollar este tema de investigación en nuestro país. En este proyecto se investigó la eficiencia de alternativas no convencionales de potabilización de agua de bajo costo para atenuar los problemas de salubridad asociados con el consumo del agua contaminada en las comunidades palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), cuya población posee bajos recursos económicos y carece de sistemas de potabilización. Esta investigación fue desarrollada en tres etapas; en la primera se evaluó la calidad de agua de la fuente de captación de agua de la comunidad de estudio; en la segunda se evaluó y comparó la eficiencia de la Moringa (*Moringa oleífera*) y la Cañandonga (*Cassia fistula*) para la clarificación del agua; y finalmente, en la tercera se compararon dos filtros de adsorción (de bioarena y de carbón activado) y dos técnicas de desinfección (lámpara UV y SODIS) mediante un test de ANOVA simple. Los resultados mostraron que la Moringa obtuvo mayor eficiencia que la Cañandonga en el proceso de coagulación, con remociones de turbiedad de hasta 96% y 69%, respectivamente; en cuanto a los filtros de bioarena y carbón activado tuvieron un rendimiento similar al igual que los la radiación UV y SODIS con un nivel de confianza del 95%. Finalmente, a pesar que se lograron eficiencias altas en los procesos evaluados, el agua no se consideró apta para consumo humano según la normatividad colombiana luego del tratamiento aplicado; sin embargo estas eficiencias podrían reducir el riesgo de contracción de enfermedades pero se necesitaría un estudio complementario para demostrarlo.

Palabras claves: Calidad de agua, potabilización a bajo costo, coagulantes naturales, pueblos palfíticos, Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM).

1. INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la vida y es considerada como el recurso natural no renovable más importante a nivel mundial (Mayorga & Mayorga, 2015). Este líquido vital ayuda a eliminar sustancias resultantes de los procesos bioquímicos que se producen en el organismo; sin embargo, también puede servir como medio de transporte de sustancias nocivas al organismo, pudiendo ocasionar daños en la salud de las personas (Chulluncuy, 2011). Es por ello que deben protegerse y evitar contaminar las fuentes de abastecimiento de agua de la población para prevenir enfermedades que pueden conllevar a una epidemia. Por este motivo es de vital importancia el estudio de la calidad del agua, siendo este uno de los parámetros que debe ser tenido en cuenta para el consumo humano y de esta forma prevenir y evitar transmisiones de enfermedades gastrointestinales, ya que un agua contaminada con sustancias químicas, sedimentos, microorganismos, residuos de animales o de personas, pueden poner en riesgo la salud de estas últimas (Méndez *et al.*, 2015).

El acceso al agua potable, actualmente es considerado uno de los retos de mayor interés (Morena *et al.*, 2015). La falta de agua potable es responsable de más muertes en el mundo que la guerra; de casi la totalidad de habitantes en el mundo (7,000 millones), el 15% tiene acceso deficiente al agua potable; en los países más pobres, la mitad del espacio que ocupan los enfermos en los hospitales corresponde a pacientes que padecen de enfermedades relacionadas con agua contaminada o falta de sistemas de saneamiento; aproximadamente 5 mil niños mueren al día por diarrea debido a esta misma problemática sanitaria relacionada con el agua de consumo (Boullosa, 2012) citado en (Moreno *et al.*, 2015).

Por otro lado, el crecimiento urbano-industrial ha incrementado la problemática de contaminación del recurso hídrico en las últimas décadas, debido al aumento en la demanda en los diferentes usos del agua (industrial, agrícola y urbano) (Durán & Rodríguez, 2006), los cuales generan residuos que se destinan finalmente en los

cuerpos de agua, logrando agravar la problemática de contaminación en las fuentes de agua. Esto es debido al alto grado de dependencia que tiene el ser humano sobre este recurso, donde los niveles de explotación de agua incrementan, hasta alcanzar en algunos casos a la insostenibilidad; aunque la resiliencia del agua a acciones humanas es alta, las fuentes de agua han sido afectadas por cambios que disminuyen su calidad y cantidad, y para mitigar esta problemática se necesita una gestión eficiente del agua (Rodríguez E. , 2016), como por ejemplo, sistemas de tratamiento que eviten la contaminación de los cuerpos de agua, ya que esta problemática además de afectar a la vida acuática, también perjudica a las fuentes de agua destinadas para uso y consumo humano. Por tanto, se requiere la implementación de sistemas de tratamiento de agua potable que permitan la remoción de esos contaminantes que son destinados en los cuerpos de agua para asegurar que el consumo humano de agua no represente ningún riesgo en la salud de la población humana (Silva *et al.*, 2015).

Sin embargo, todavía existen comunidades en el mundo que no cuentan con sistemas de potabilización que permitan que la población goce de agua potable, especialmente en las comunidades rurales (Asprilla *et al.*, 2013), donde las dificultades técnicas y financieras no permiten la implementación de sistemas de potabilización; por lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció que existen medidas simples, aceptables, y de bajo costo para las comunidades que son capaces de mejorar la calidad microbiológica del agua para prevenir enfermedades, incluyendo la muerte causada por diarrea (Cruz *et al.*, 2005). Por ello, ver sistemas descentralizados a bajo costo en estas regiones, como lo son los procesos caseros de adsorción, es muy común.

En los pueblos palafíticos de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), ubicados en el Caribe norte colombiano y que hacen parte del municipio de Sitio Nuevo (Magdalena), a pesar que los habitantes consumen el agua sin tratamiento adecuado de potabilización (Narváez *et al.*, 2008), no se ha realizado un estudio que muestre la eficiencia de alternativas o procesos a bajo costo para la potabilización del agua que consumen estas poblaciones.

Es por ello que el presente trabajo tuvo como finalidad investigar la eficiencia de alternativas de potabilización de agua a bajo costo para atenuar los problemas de salubridad asociados al consumo de agua contaminada en los pueblos de Nueva Venecia y Buena Vista, localizados en las cercanías de la Ciénaga Grande de Santa Marta.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, las comunidades rurales generalmente presentan una problemática asociada al consumo de agua insegura para la salud humana, y esto se ve más representado en países en vía de desarrollo, como Colombia, que no cuentan con los recursos financieros para la implementación de sistemas de tratamiento de agua potable y abastecimiento a la población en todo su territorio (Arango, 2004). Este es el caso de estudio de esta investigación, el cual se enfocó en pueblos palafíticos de la región Caribe, localizados en el departamento del Magdalena. Estos pueblos son Nueva Venecia y Buenavista, que se encuentran asentados en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), los cuales no cuentan con ningún sistema de tratamiento de agua potable que contribuya al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes.

Históricamente, en el mundo se han empleado técnicas de purificación a bajo costo para nivel domiciliario porque básicamente pueden construirse con materiales locales (Timothy *et al.*,2014; D'Alessio *et al.*,2016), cuyos resultados de remoción de turbiedad y patógenos han sido altos, las cuales han sido mejoradas al transcurrir el tiempo; por lo que aplicar este tipo de tecnologías podría ser de gran ayuda en los pueblos de palafitos de estudio, pues no se conoce la implementación de un sistema de potabilización a bajo costo en los hogares, ni mucho menos su efectividad en las fuentes de aguas que abastecen a estas comunidades.

Por lo anteriormente enunciado, es pertinente formular las siguientes preguntas de investigación sobre el tratamiento de la fuente de captación de agua de los pueblos palafíticos estudiados:

- ✓ ¿El uso de alguno de los dos coagulantes propuestos (Moringa y Cañandonga) es eficiente para la remoción de partículas suspendidas del agua de consumo de Nueva Venecia y Buenavista?
- ✓ ¿Cuál de los dos filtros estudiados (bioarena y de carbón activado) es más eficiente para la clarificación del agua?
- ✓ ¿Cuál de las dos técnicas de desinfección estudiadas (SODIS y radiación UV) funcionaría mejor para el agua previamente filtrada?

3. JUSTIFICACIÓN

Según informe de (WHO/UNICEF, 2015), la meta mundial de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) relacionada con el agua potable se alcanzó en el 2010 (que el 88% de la población tuviera acceso a fuentes mejoradas para 2015). Sin embargo, en este documento se reportaron otros datos muy importantes a tener en cuenta en el 2015, los cuales fueron los siguientes: (1) 663 millones de personas sin acceso a agua potable mejorada en todo el mundo; (2) la población mundial urbana tiene mejor acceso a fuentes de agua potable mejoradas que la rural, la primera con 96% y la segunda con 84%; y (3) ocho de cada diez personas que viven en zonas rurales no tienen acceso a fuentes de agua potable mejoradas. Lo anterior evidencia el gran reto que tiene la humanidad para proteger la salud de todos los habitantes en el mundo.

Nueva Venecia y Buenavista, pueblos palafíticos de la CGSM, hacen parte de las poblaciones sin acceso a agua potable en Colombia, ya que el agua para consumo doméstico llega a estas comunidades por medio de bongoductos (canoas grandes y profundas que transportan agua (Ver Figura 1) desde la desembocadura del caño de Aguas Negras (brazo del río Magdalena) hasta las familias que habitan estos pueblos. El agua suministrada a la comunidad sin ningún tipo de tratamiento previo, se almacena en tanques plásticos para posteriormente ser clorada antes de ser distribuida a la comunidad. En estas condiciones el agua es utilizada para la mayoría de sus actividades cotidianas (consumo, manipulación de alimentos, oficios varios, higiene, etc.) (Ver Figura 2).

El consumo de agua no potable, la carencia de letrinas, servicio de aseo, el vertimiento de residuos líquidos y sólidos de los asentamientos humanos cerca a los cuerpos de agua superficiales y los desechos agroquímicos son las causas principales de enfermedades reportadas en los pueblos palafíticos de estudio: las infecciones respiratorias agudas (IRA) y las enfermedades diarreicas agudas (EDA) (CEP, 2011).

Es por ello que se hace pertinente en esta investigación evaluar la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua de la fuente de captación de agua superficial (caño Aguas Negras) y en la distribución de agua a los pobladores de los pueblos palafíticos: Nueva Venecia y Buenavista; y así mismo, proponer métodos no convencionales (artesanales) de potabilización de bajo costo para estas comunidades rurales (como lo es el caso de los coagulantes naturales, ya que no requieren de ningún proceso químico para su obtención a diferencia de los coagulantes químicos que son procesados químicamente en laboratorio por personal especializado, lo cual representa menor inversión para su adquisición en comparación al de los coagulantes químicos porque estos compuestos naturales pueden obtenerse localmente), evaluando su eficiencia en la remoción de algunos de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos definidos en la normatividad colombiana vigente.



Figura 1. Bongoductos de transporte de agua en los pueblos palafíticos de la CGCM. Fuente: tomada por el autor



Figura 2. Vivienda con tanques de almacenamiento de agua. Fuente: Tomada por el autor

4. ANTECEDENTES

La revisión de la literatura científica de este proyecto se dividió en cuatro componentes. El primero, se basó en el uso de coagulantes naturales incluyendo la *M. oleífera* (Moringa) y *C. Fistula* (Cañadonga); el segundo, en los dos procesos de adsorción estudiados (filtro lento de arena y de carbón activado); el tercero, en los dos procesos de desinfección a bajo costo (SODIS y luz Ultravioleta); y el cuarto, en la combinación de estos procesos para la potabilización del agua a bajo costo en comunidades rurales.

4.1 Coagulantes naturales

En la actualidad ha surgido el interés de utilizar coagulantes naturales para el reemplazo de productos químicos utilizados con el fin de clarificar el agua por varias razones, entre ellas: los compuestos químicos pueden ocasionar problemas en la salud, como por ejemplo: el aluminio residual en el agua puede causar Alzheimer (Gauvreau, 2000; Flaten, 2001), además de síndromes de demencia y disminución de la capacidad motora y mental (Okuda *et al.*, 2001); además de las afectaciones a la salud, resultan más costosos que los naturales (Betatache *et al.*, 2014), imposibilitándose su aplicación en comunidades con bajos recursos económicos; y generan mayor volumen de lodos residuales, (sales de aluminio que son los coagulantes más usados producen altas cantidades de lodo (Jodi *et al.*, 2012)). Es por ello que se ha hecho pertinente explorar otras alternativas más amigables con el ambiente y la salud humana, como lo es el uso de coagulantes naturales, de los cuales muchos de ellos han obtenido altas tasas de remoción de la turbiedad del agua como se puede consultar en el artículo publicado por Choy (Choy *et al.*, 2014).

En el Instituto de Campo y Cultivos de Hortalizas de Novi Sad (Serbia), Kuki *et al.* (2015) investigaron la aplicabilidad de los extractos de semillas de habas (*Vicia faba* L), como coagulante natural. Para ello, el coagulante fue obtenido por extracción con soluciones de cloruro de sodio (NaCl) y agua destilada, a partir de semillas de habas molidas, y se aplicó en diferentes dosis de 0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1 y 1.5 ml/L mediante una prueba de jarras para la clarificación de un agua sintética con

turbiedades iniciales de 20, 45 y 90 NTU. Se determinó que la dosis óptima del coagulante fue de 0,125 ml/L en la que se logró remover la turbiedad del agua en un rango de 50 al 55%.

En Malasia, Choy *et al.* (2016) investigaron la aplicación de almidones convencionales (arroz, trigo, maíz y patata) como potenciales coagulantes naturales en el tratamiento de agua turbia, y se determinó que el almidón de arroz superó a los otros estudiados, eliminando la turbidez en un 50% con una dosis óptima de 120 mg/L y un pH inicial 4 en un tiempo de sedimentación de 30 min. Adicionalmente se encontró que el proceso de coagulación en dos etapas usando almidón de arroz en autoclave y coagulantes químicos aumentaron la eficiencia en la remoción de la turbidez de al menos en un 30% y redujeron la cantidad de lodo en un 60%, lo cual es favorable para este proceso de clarificación del agua.

Fuentes *et al.* (2012) evaluaron la efectividad de *Opuntia cochinellifera* (Tunita) como coagulante natural para la potabilización del agua de una planta de tratamiento del municipio Valmore Rodríguez, estado Zulia, Venezuela. En este estudio se simuló a escala de laboratorio (Universidad de Zulia) el proceso de coagulación-floculación, sedimentación y filtración en muestras de aguas diluidas (20, 40, 60 y 80 NTU) a las que se aplicaron diferentes dosis del coagulante estudiado (1000, 2000, 3000, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 8000 ó 10000 ppm). Se encontró que para las turbiedades estudiadas (20, 40, 60 y 80 NTU), las dosis óptimas del coagulante fueron de 4500, 8000, 8000 y 6000 ppm, respectivamente, las cuales obtuvieron altos porcentajes de remoción: antes de la filtración entre el 78,59 - 85,88% y después de esta entre un 86,10 - 93,90%, demostrando que la tuna *Opuntia cochinellifera* puede considerarse como una alternativa efectiva para la remoción de la turbidez del agua en el tratamiento de agua para consumo humano.

Hernández *et al.* (2013) realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar la actividad coagulante del extracto de semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) en aguas con alta turbidez. Para ello, extrajeron el coagulante del tamarindo y se prepararon varias concentraciones que se aplicaron al agua con alta turbiedades

(agua sintética preparada con arcilla a escala del laboratorio de Universidad Zulia, Venezuela) mediante un ensayo de prueba de jarras. Se demostró que el *Tamarindus indica* puede ser considerado como alternativa natural para la potabilización del agua con valores de turbiedad entre 100 y 350 NTU, ya que los porcentajes de remoción de este parámetro oscilaron entre 72,45% y 89,09% antes del proceso de filtración y luego después del filtrado, entre 98,78% y 99,71%.

En Colombia también se han realizado diversos estudios relacionados con el uso de coagulantes naturales para la remoción de la turbiedad del agua para consumo humano. Ramírez *et al.* (2011) evaluaron dos especies vegetales: *H. popayanensis*, *Hylocereus undatus* y *M. arboreus* como coagulantes de un agua servida de la quebrada La Salada. Se llevaron a cabo pruebas de jarras con concentración del coagulante de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ml; comparando con dos blancos (coagulante sintético de sulfato de aluminio Al_3SO_4 y agua cruda sin tratar). Se encontró que *Heliocarpus popayanensis* (Balso blanco) e *Hylocereus undatus* (Pitahaya o Cactus trepador) presentaron poder de floculación (P valor de 0.017), al aumentar la concentración de coagulante aumentó la coagulación (P valor de 0.08), además el almacenaje del coagulante no alteró los efectos de las especies sobre el proceso de coagulación (P valor de 0.7813).

Villabona *et al.* (2013) caracterizaron la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) y extrajeron un coagulante de la misma, con el propósito de determinar características necesarias que lo hacen potencial agente para remover turbidez en aguas. La muestra de agua fue tomada del Canal del Dique, a la altura de Puerto Badel corregimiento de Arjona – Bolívar, la cual presentó las siguientes condiciones iniciales: Color (UPC=167.99), turbidez (NTU=170.96) y pH=7.8. Se obtuvo un máximo de remoción de color del orden del 54%, y una remoción de turbidez de 72% cuando se aplicó el coagulante natural estudiado en una dosis de 90 mg/L al agua cruda con una turbidez inicial de aproximadamente 171 NTU.

Trujillo *et al.* (2014) realizaron un experimento en la Universidad Católica de Manizales (Colombia) en el que analizaron la remoción de turbiedad en agua proveniente de una fuente natural en el sector El Cerro de Oro de la ciudad de

Manizales, mediante coagulación/floculación, usando almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.). El experimento consistió en la variación de los factores (pH, dosis de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta) en función de la variable respuesta (turbiedad) con el objeto de optimizar el uso de almidón de plátano como ayudante en el proceso de coagulación-floculación para la reducción del uso de coagulantes químicos. Se encontró que la mejor eficiencia de remoción de turbiedad se obtuvo para los siguientes valores de los factores: pH de 5, 50:50 porcentaje en peso de la combinación sulfato de aluminio/almidón de plátano, velocidad de mezcla rápida de 150rpm y velocidad de mezcla lenta de 20rpm.

Rodríguez *et al.* (2015) evaluaron la eficacia del quitosano (definido como un polisacárido de alto peso molecular y que se obtiene mediante desacetilación de la quitina (N-acetilglucosamina) de: artrópodos, zooplancton marino, hongos, insectos, entre otras especies) como coagulante durante el tratamiento del agua cruda proveniente de los perfiles Creager de las plantas de tratamiento de agua potable denominadas: La Gota Fría y Huaricha de la empresa de servicios públicos del municipio de Valledupar, Cesar. Se obtuvo como resultado un 99,9 % en la remoción de la turbidez inicial de 1500 NTU con dosis óptima de 40 mg/L; y un 96% para una turbidez inicial de 100 NTU con la dosis óptima de 20 mg/L.

Por otro lado, la Moringa ha mostrado ser una de las semillas utilizadas ya que se ha encontrado remoción de la turbiedad del agua similar a la de coagulantes químicos (Lédo *et al.*, 2009), siendo una de las semillas con mayor remoción de contaminantes en el agua (Betatache *et al.*, 2014).

Pritchard *et al.* (2009) examinaron los extractos de *Moringa oleífera* y otras dos plantas (*Jatropha curcas* y goma guar) en comunidades rurales de Malawi que se abastecen de aguas subterráneas. Estos extractos naturales se añadieron a las muestras de agua obtenidas de cinco pozos poco profundos en Malawi y se evaluaron sus respectivos potenciales de coagulación mediante pruebas de jarras, determinando los parámetros microbiológicos (coliformes) y fisicoquímicos, tales como: la temperatura, pH y turbidez. Los tres coagulantes evaluados lograron una eficiencia en la remoción de la turbidez del agua subterránea superior al 90%, en

coliformes del 80%, mientras que el pH aumentó con las dosis pero se mantuvo dentro de los rangos permisibles en todas las muestras analizadas.

Pritchard *et al.* (2010) realizaron un estudio paramétrico en la Universidad Metropolitana de Leeds, Reino Unido, con el objetivo de determinar la dosis óptima para la remoción de la turbidez del agua cruda, la influencia del pH y la temperatura en la coagulación con *Moringa oleífera*. La dosis óptima de *M. Oleífera* para aguas con turbidez entre 40 y 200 NTU, osciló entre 30 y 55 mg/L; en 130 NTU la dosis óptima fue de 50 mg/L; se encontró un pH óptimo de 6.5; y en las aguas menores de los 15°C se obstaculizó el proceso de coagulación con este coagulante estudiado.

Estudio realizado por García *et al.* (2015) tuvo como objetivo proponer la aplicación en el tratamiento de agua de coagulantes naturales extraídos nativos de Mozambique, centrándose especialmente en la Moringa como agente clarificador en países de bajos recursos económicos. Las actividades del proyecto se realizaron mediante varias fases: Cultivo de la Moringa, extracción sólido-líquido de su semilla, extracción del compuesto activo del coagulante, aplicación del coagulante a un agua sintética, y finalmente se comparó con el policloruro de aluminio. Se encontró un rendimiento muy similar al del policloruro de aluminio alcanzando aproximadamente al 90% de reducción de la turbidez de agua cruda; adicionalmente proponen un proceso de extracción del coagulante activo para la optimización en la reducción de las partículas suspendidas de las aguas.

Lédo *et al.* (2009) también encontraron que la *Moringa oleífera* tuvo un comportamiento similar (remoción en la turbidez del orden del 90%) al de otro coagulante químico, el sulfato de aluminio en un estudio realizado con muestras de agua provenientes de la Laguna de Jiqui, estado del Rio Grande do Norte, Natal-Brasil. Este estudio fue llevado a cabo a través de pruebas de jarras en donde las dosificaciones y el pH fueron variados entre límites establecidos.

Un estudio similar en el que se comparó la Moringa con el sulfato de aluminio fue el realizado por Sandoval y Laines (2013), en el que comparó la eficiencia de coagulación entre tres tipos de soluciones obtenidas de las semillas de *Moringa*

oleífera y el sulfato de aluminio mediante prueba de jarras en muestras de agua del río Samaria que alimenta la planta de tratamiento el Manguito, ubicada en Nacajuca, Tabasco, México. Se encontró que el tratamiento con sulfato de aluminio presentó los valores más altos de remoción de turbiedad (95.60%) y color (98.32%). Sin embargo, realizando soluciones de Moringa con cloruro de sodio y agua de mar también se obtuvieron remociones de turbiedad altas 92,03 y 90,72%, respectivamente.

Investigación realizada en la ciudad de Aracaju, Estado de Sergipe, Brasil por Pereira *et al.* (2017) evaluaron el efecto de semillas *Moringa oleífera* con y sin extracción de aceite como coagulante para eliminar cianobacterias de diferentes aguas superficiales naturales. El experimento fue llevado a cabo con muestras de agua con baja (5-10 NTU) y alta (30-60 NTU) turbidez inicial, con y sin células de *Microcystis aeruginosa* empleando el coagulante con la extracción de su aceite con etanol y sin la extracción del aceite. Se encontró que el polvo integral de Moringa es un coagulante efectivo en la eliminación de cianobacterias y turbidez de las aguas superficiales y la extracción de su aceite no es necesaria cuando se usan estas semillas procesos de coagulación/floculación/sedimentación.

Feria *et al.* (2014), evaluaron la eficiencia de la semilla de *M. Oleífera* como coagulante y sus efectos sobre el pH y la alcalinidad. El estudio fue realizado con muestras de agua del río Sinú (Córdoba); para ello, se prepararon dosis de Moringa (desde 2,5 mg/L hasta 30,0 mg/L) con extracción de aceite en solución salina, las cuales se aplicaron a las muestras de agua tomadas de dicho río. Se encontraron remociones altas de turbidez mayores al 90% empleando dosis entre 4,5 mg/L y 17,5 mg/L para turbiedades mayores a 90 UNT; en cambio para turbiedades iniciales menores a 66 UNT, las eficiencias fueron también menores (entre 70 % y 85 %). Además, se evidenció en el estudio que el pH y la alcalinidad no presentaron alteraciones significativas en todos los ensayos realizados.

Es importante mencionar que la *C. fistula* (Cañandonga) promete ser una alternativa sostenible para la purificación del agua. Estudio realizado por Guzmán *et al.* (2015) tuvo como objetivo evaluar el polvo de semillas de Cañandonga como agente

coagulante natural así como su aplicabilidad en el tratamiento de aguas para consumo humano. El estudio se realizó con muestras de aguas del Canal del Dique, corregimiento de Gambote (Bolívar), a las que se aplicó este coagulante natural variando sus concentraciones (5, 10, 15, 20, 25 y 30 ppm) mediante prueba de jarras. Se determinó la dosis óptima de 20 ppm de polvo de la semilla estudiada, con la cual se removi6 del agua el 95% de la turbiedad y 87,5% del color; además que *C. fistula* en esta concentración no afect6 mayormente los valores de pH, alcalinidad total y dureza total. Lo que demuestra ser un coagulante 6til para tener en cuenta en el tratamiento de agua para consumo humano, así como para el de agua residual como lo report6 (Asif *et al.*, 2008).

No obstante, en las comunidades palaf6ticas del complejo cenagoso de la Ciénaga Grande de Santa Marta no se han realizado estudios de la aplicaci6n de coagulantes naturales para el proceso de coagulaci6n para la purificaci6n de agua, a pesar de que actualmente estos constituyen un tema de inter6s, al presentar altas tasas de remoci6n de turbidez del agua y al mismo tiempo considerarse seguros para la salud humana. Sin embargo, su aplicaci6n requiere pruebas de laboratorio que permitan establecer las dosis 6ptimas del coagulante para el agua a tratar; en el caso de este trabajo se evaluaron dos coagulantes naturales: Moringa y Cañandonga, cuyo rango de concentraciones encontradas en esta revisi6n estuvieron entre 30-200 mg/L para la Moringa y entre 5-25 mg/L para la Cañandonga, lo cual sirvi6 de base para la selecci6n de las dosis evaluadas en este trabajo.

4.2 Procesos de filtraci6n a bajo costo en la potabilizaci6n de agua (filtro lento de arena y de carb6n activado)

Los procesos de adsorci6n como tratamiento descentralizado en la potabilizaci6n del agua en comunidades rurales son comunes y han demostrado ser eficaces para tal fin. Una de las t6cnicas m6s empleadas actualmente en comunidades rurales es la del filtrado con arena, la cual ha demostrado ser eficaz para la purificaci6n del agua de consumo humano.

Elliott *et al.* (2008) estudiaron las condiciones hidr6ulicas dentro de un filtro de arena, así como su capacidad en la remoci6n de bacterias y virus ent6ricos. Para

ello, se sembró *E. coli*, Echovirus tipo 12 y bacteriófagos (MS2 y PRD-1) en agua superficial, la cual se pasó por el filtro de arena. Como resultado en la remoción de los microorganismos, se encontraron reducciones de *E. coli* y Echovirus tipo 12 similares (superiores al 50%) después de 30 días de funcionamiento del filtro, mientras que las de bacteriófagos fueron mucho más bajas (desde 0 al 95%); lo que indicó que el rendimiento del filtro depende del agente viral específico.

Fabiszewski *et al.* (2012) investigaron la capacidad de un filtro de arena plástico de Hydraid para reducir las enfermedades diarreicas en hogares de las comunidades rurales en Copan (Honduras) mediante un ensayo aleatorio controlado. Por medio de un análisis de regresión logística para el grupo muestreado se estimó que la incidencia de enfermedades diarreicas en niños menores de 5 años se redujo en aproximadamente 45% en los hogares que emplearon el filtro Hydraid en comparación con aquellos que no lo usaron, demostrando que las viviendas que usaron el filtro tuvieron una calidad de agua potable significativamente mejor sin importar la fuente de agua o la estación.

Un estudio similar fue el realizado por Stauber *et al.* (2012), que consistió en un ensayo controlado aleatorio por conglomerados en 13 comunidades (incluyendo 189 casas y 1147 participantes en el distrito Angk Snoul) para evaluar el desempeño de un biofiltro de arena de plástico y su impacto en la salud. Los resultados mostraron que los pueblos que trataron el agua con el biofiltro de arena plástico obtuvieron concentraciones significativamente más bajas de *E. coli* en el agua y presentaron menores tasas de incidencia de enfermedades diarreicas (0.41) con un intervalo de confianza de 0,24 a 0,69 al 95% de confiabilidad en comparación a la población que no trató el agua con dicho biofiltro.

Estudio realizado por Mwabi *et al.* (2012) tuvo como propósito examinar cinco filtros: filtro de bioarena estándar, filtro de bioarena de zeolita, filtro de cubo, filtro de vela cerámica y filtro de olla poroso impregnado con plata, con el objeto de evaluar su capacidad de mejorar la calidad de agua potable en hogares. Estos filtros fueron fabricados en el taller de la Universidad Tecnológica de Tshwane y se evaluó su eficacia para eliminar la turbidez, coliformes fecales y *Escherichia coli* a partir

múltiples muestras de agua. La menor turbidez obtenida después de la filtración fue de 0,6 NTU mediante los filtros de bioarena estándar y de vela cerámica; mientras que la mayor fue de 11 NTU con el filtro de cubo. En cuanto a la remoción de las bacterias oscilaron de 90 a 99,9% entre los filtros estudiados.

Guchi *et al.* (2014) realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la filtración de arena lenta en macetas de arcilla para la eliminación de coliformes termotolerantes y la turbidez en hogares del altiplano central de Etiopía. Para ello se seleccionaron ochenta hogares para tratar el agua mediante el filtro de arena lento en macetas de arcilla, de los cuales se dividieron en dos grupos de 40 familias que se abastecían en diferentes fuentes de aguas superficiales variando la época del año. Las eficiencias en la remoción de turbiedad y coliformes termotolerantes en los hogares que usaron el filtro oscilaron entre 92-94% y 96-98%, respectivamente; adicionalmente, se compararon los dos grupos y no varió estadísticamente ($\alpha=0,05$) su comportamiento en comparación a los porcentajes de remoción de contaminantes evaluados, indicando que el filtro lento de arena en macetas de arcilla es seguro para el consumo humano.

Young y Madramootoo (2014) compararon el rendimiento de dos filtros de bioarena, uno con funcionamiento continuo y otro intermitente. Para ello, cinco fueron operados de forma intermitente con un período de residencia de 24 h, mientras que los otros tres continuamente. Para ello, se construyeron ocho biofiltros de arena. Cinco fueron operados de forma intermitente con un período de residencia de 24 h, mientras que los otros tres fueron operados continuamente. El funcionamiento continuo de los filtros resultó en una reducción significativamente mejor de *Escherichia coli* (3,71 unidades logarítmicas frente a 1,67 unidades logarítmicas), bacteriófago MS2 (2,25 unidades logarítmicas frente a 0,85 unidades logarítmicas) y turbidez (96% frente a 87%) en comparación al intermitente. Por tanto, se concluyó que aunque los filtros de bioarena generalmente se construyen para operar intermitentemente, se demostró que funcionan significativamente mejor cuando operan de forma continua.

Segalla *et al.* (2015) compararon dos mecanismos de limpieza de la capa filtrante en filtros lentos de arena para el tratamiento de agua de consumo doméstico. Para ello, fueron contruidos dos filtros con las mismas características de la capa filtrante, los cuales se hicieron operar en paralelo con las mismas condiciones (tasa de filtración de 0,16 m/h y carga hidráulica máxima variable de 0,80 m) para el filtrado de agua procedente de lago con alta carga algal. Mediante campañas de filtración de 14 días en promedio, uno de los filtros fue limpiado de forma convencional y el otro por lavado contracorriente. Se encontró que ambos filtros tuvieron rendimientos similares en cuanto a la calidad del agua filtrada: la turbidez del agua filtrada a menos de 1 NTU, color aparente promedio de 15 Pt/Co y la eliminación de coliformes totales y E. Coli alrededor de 1,5 unidades logarítmicas. Sin embargo, los resultados del lavado contracorriente indicaron que facilita el funcionamiento de los filtros lentos de arena (consumo de tiempo de 7 min) y se asegura la calidad de agua en términos de los parámetros evaluados.

Raza *et al.* (2015) evaluaron un sistema de filtración lenta de arena que constaba de lecho filtrante grava y arena para tratar agua de canal, examinando antes y después del tratamiento los siguientes parámetros del agua: pH, sólidos disueltos totales, turbidez y la conductividad eléctrica de un agua. Se determinó en el estudio que la eficiencia máxima del sistema propuesto fue de un 99% en la reducción del nivel de turbidez y de un 6% en la reducción de sólidos disueltos totales. Por tanto, se concluyó que el sistema propuesto presentó mayor efectividad en la reducción de la turbidez del agua del canal entre los parámetros examinados.

Por otra parte, el carbón activado también es usado para el proceso de filtración en comunidades rurales con escasos recursos económicos. Siong *et al.* (2013) compararon dos tipos de carbón activado granular (A y B) para estudiar su rendimiento como filtros de purificación de agua de consumo doméstico en muestras de agua obtenidas de grifo y de pozo; adicionalmente se evaluó su funcionamiento con el tratamiento de radiación U.V. Los resultados mostraron que el carbón activado granular A se comportó mejor que el carbón activado granular B en cuanto a la

reducción de turbidez, sólidos suspendidos totales, DBO y DQO, con promedios de remoción obtenidos de 75, 90, 80 y 96%, respectivamente.

Ratnoji y Singh (2014) realizaron un estudio comparativo de filtración a escala piloto entre diferentes granos de carbón activado de cáscara de coco WTD816, WTE830 y WTE124) y el filtro de arena. Los filtros de carbón activado fueron ensamblados independientemente a diferentes profundidades y también de forma combinada. Para ello, se examinó la reducción de hierro, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) en agua de río. Se encontró la mayor remoción de hierro (95%), DBO (30%), DQO (75%) fue con el carbón activado de grado más fino; mientras que en el filtro lento de arena la remoción de estos parámetros fue casi nulo, lo que demuestra la importancia del carbón activado en la remoción de ciertos contaminantes en el agua para consumo humano.

Guest *et al.* (2011) llevaron a cabo un estudio que tuvo como objetivo evaluar la eficacia de filtros de carbón activado granular revestido de zinc-sulfato-Heptohidrato y arena en la eliminación efectiva de patógenos de aguas pluviales urbanas. En esta investigación se realizaron varios ensayos de laboratorio y se logró en promedio una eliminación del 98,42% de la concentración de entrada de *E. Coli*. Sin embargo, se hallaron lixiviados de zinc en el agua tratada, demostrando la necesidad de realizar una investigación adicional sobre la estabilización del mecanismo de recubrimiento empleado.

Cruz *et al.* (2015) evaluaron la eficiencia de un filtro a base de carbón activado generado a partir de coronta de maíz e impregnado con quitosano, para el tratamiento complementario del agua potable. En este experimento se determinó que el filtro logró reducir las concentraciones de turbidez, cloro residual en agua potable entre 46,9-68,9% y 87,5-100%, respectivamente; en cuanto a las bacterias heterótrofas en el agua entre 32,8-66,7% en los primeros 50 min del experimento.

En resumen de los artículos revisados, los filtros de bioarena y de carbón activado han demostrado ser eficaces para la clarificación del agua de consumo en los hogares y también son capaces de remover microorganismos patógenos como

bacterias y virus entéricos, demostrando su alta potencialidad para reducir el riesgo de enfermedades en el consumo de agua. En este trabajo se evaluó el funcionamiento individual de estos dos tipos de filtros en cuanto a la remoción de algunos parámetros de calidad de agua, estudio que no se ha realizado en las comunidades palafíticas estudiadas, por lo que aportará para la implementación a futuro de este tipo de tecnología descentralizada si se tienen en cuenta los resultados de esta investigación.

4.3 Desinfección a bajo costo (SODIS y lámparas UV)

Los métodos de desinfección solar (SODIS) y de radiación UV son económicos y tienen gran incidencia en la eliminación de microorganismos patógenos en el agua para consumo humano. Boyle *et al.* (2008) estudiaron la cinética de inactivación de *Campylobacter jejuni*, *Yersinia enterocolitica*, *E. coli enteropatógena*, *Staphylococcus epidermidis* y endosporas de *Bacillus subtilis*, mediante exposición fuerte a la luz solar (SODIS). Se encontró que el tiempo de exposición requerido para la inactivación completa (por debajo del límite máximo permisible) en condiciones de irradiación global máxima ($\sim 1.050 \text{ W m}^{-2} \pm 10 \text{ W m}^{-2}$) fue el siguiente: *C. jejuni*, 20 min; *S. epidermidis*, 45 min; *E. coli enteropatógena*, 90 min; *Y. enterocolitica*, 150 min; mientras que para las endosporas de *B. subtilis* se encontró que después de 16 horas de exposición a la luz solar, el 4% de las células permaneció viable. Por medio de este estudio, se demostró la eficiencia del SODIS en una serie de microorganismos emergentes en el agua, pero ineficiente en aquellos microorganismos que forman esporas ya que estos pueden sobrevivir en este proceso de desinfección.

Heaselgrave y Kilvington (2010) investigaron la incidencia de la riboflavina en la eficacia de la desinfección solar simulada a 150 vatios por metro cuadrado (W m^{-2}) para eliminar los siguientes microorganismos en el agua: *E. coli*, *Fusarium solani*, *Candida albicans* y quistes de *Acanthamoeba polyphaga*. Se encontró que la riboflavina aumentó significativamente la eliminación de *E. coli*, *Fusarium solani* y *Candida albicans* en rango de mayor de 3 a 4 unidades logarítmicas después de 2-6 horas; mientras que con los quistes de *A. polyphaga*, la eliminación (3,5 unidades

logarítmicas) se obtuvo sólo en presencia de riboflavina y 250 W m^{-2} después de 6 horas de irradiación.

Awrajaw *et al.* (2014) realizaron un experimento con SODIS para la eliminación de coliformes fecales en agua con las siguientes características turbidez de 2 NTU, pH de 7; variando las temperaturas del agua a 38,1, 41,8, 45,6 y 51,1 ° C y las intensidades solares, el uso de botellas de plásticos blancas y negras llenas a diferentes profundidades. Los resultados mostraron que la tasa de inactivación microbiana se relacionó con la profundidad del agua, turbidez, tipo de recipiente, intensidad de luz y color del recipiente empleado. Sin embargo, la colocación de la botella, exposición y pH del agua no se relacionaron con la inactivación microbiana. Mediante el ajuste de los parámetros, la inactivación completa e irreversible de coliformes se logró con una exposición de cuatro horas en las zonas donde la radiación solar fue de al menos $3,99 \text{ kWm}^{-2}$, evidenciando que el SODIS juega un papel importante en el agua potable en aquellas comunidades rurales que cuentan con alta intensidad de sol.

Mäusezah *et al.* (2009) evaluaron el efecto de SODIS en la reducción de la diarrea entre los niños menores de 5 años mediante un ensayo clínico controlado en 22 comunidades rurales de Bolivia. Para ello, dos grupos de niños fueron comparados: el primer grupo de 225 hogares (376 niños) fue capacitado para la aplicación de SODIS en botellas, y el otro sirvió como control (200 hogares con 349 niños). Se observó que la tasa de cumplimiento con el tratamiento de SODIS fue del 32,1% y se determinó que la tasa de incidencia de enfermedad gastrointestinal reportada en niños del primer grupo fue de 3,6 episodios/año en comparación con el grupo control (4,3 episodios/año).

Garrido *et al.* (2013) evaluaron la técnica SODIS para la desinfección del agua para abastecimiento en una hacienda de Venezuela que no cuenta con agua potable. Para ello se tomaron muestras de agua de río de 2000 ml y de 5000 ml; a la primera se les aplicó SODIS y a la segunda, empleando SODIS y un reflector solar. A pesar de que las muestras no cumplían con la norma (coliformes totales de 200-760 UFC/10 ml y coliformes fecales de 20 UFC/100 ml, la eficiencia del método SODIS

fue del 100%, pero las muestras de agua de 5000 ml requirieron de dos días de exposición solar para su desinfección independientemente de si utilizan o no el reflector solar.

Muñoz *et al.* (2014) evaluaron el método SODIS únicamente y combinado con *Artemisia annua* como alternativa para la desinfección en comunidades sin acceso a agua potable. Para ello, determinaron la eficiencia del método SODIS en la remoción de los siguientes microorganismos (*E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecalis* y *Salmonella typhimurium*), exponiendo durante un tiempo mínimo de 6 horas el agua en botella tipo PET con concentración inicial de 1×10^6 UFC/100ml de cada microorganismo. En esta investigación se encontró que la mejor eficiencia en la remoción de los cuatro microorganismo fue el SODIS en comparación al tratamiento combinado de SODIS + *Artemisia annua*.

Gruber *et al.* (2013) probaron el sistema de desinfección por luz ultravioleta (Mesita Azul) diseñado para tratar el agua potable de los hogares rurales de México. Para ello, se realizó un ensayo aleatorio en grupo de 24 comunidades (444 familias) que recibieron la intervención para el tratamiento de agua. Midiendo la contaminación del agua y la diarrea, se encontró que el sistema aumentó el porcentaje de hogares con acceso a agua potable tratada y almacenada de manera segura (23-62%) y redujo el riesgo de diarrea en aproximadamente un 20%.

Elmaksoud *et al.* (2013) experimentaron si un dispositivo de luz UV era capaz de reducir virus (poliovirus tipo 1, el rotavirus SA-11 y virus MS-2) hasta el nivel de cumplimiento de los límites permitidos por la EPA de E.E.U.U. Se encontró que el dispositivo fue capaz de inactivar al menos 4 unidades logarítmicas del poliovirus tipo 1, el rotavirus SA-11 y virus MS-2 en volúmenes de 500 ml de agua, pero se observó que en el caso de un agua con alta turbidez y materia orgánica se necesitaba filtración para conseguir un 4 unidades logarítmicas en la reducción de los virus estudiados.

Gutierrez *et al.* (2014) evaluaron la eficiencia de un sistema purificador de agua de luz UV (LLaveoz) para la eliminación de coliformes totales y cepas diarreicas de *E. Coli*. En este estudio se trataron con dicho dispositivo 62 muestras obtenidas en

hogares en un periodo seco y lluvioso. Después del tratamiento, el agua purificada con Llaveoz no presentó cepas diarreicas de *E. Coli*, mientras que en agua no tratada se lograron aislar 28 cepas de este microorganismo. En cuanto a coliformes totales tuvieron una reducción del 80,3% y 72,3% en época seca y lluviosa, respectivamente; lo cual evidenció la eficiencia potencial del sistema en la remoción de microorganismos patógenos en el agua de consumo humano.

Finalmente, estas investigaciones revisadas permiten concluir que las técnicas de radiación UV mediante lámpara UV y la desinfección solar (SODIS) son tan eficientes como la cloración, pero para que sean efectivas requieren principalmente de un agua clarificada, y en el caso de SODIS que se tenga en cuenta el volumen a exponer a la radiación solar ya que en grandes volúmenes (mayores a 5 Litros) requieren de mucho tiempo para la eliminación de los microorganismos patógenos. Sin embargo, en los pueblos palafíticos se ha analizado la eficiencia de estas dos técnicas de desinfección, por lo que se sugiere que los resultados de esta investigación se tengan en cuenta para la aplicación de las mismas en posteriores proyectos de tratamiento no convencional en estas comunidades palafíticas.

4.4 Procesos combinados de potabilización a bajo costo

La potabilización del agua abarca una serie de procesos complementarios para la remoción de contaminantes y microorganismos patógenos que generan problemas en la salud humana. Sin embargo, estos procesos pueden obtenerse a bajo costo en comunidades rurales como se ha descrito en los numerales anteriores, por ejemplo: uso de coagulantes naturales (coagulación), filtros lentos de arena (filtración), SODIS (desinfección), entre otros; los cuales pueden combinarse para mejorar la calidad de agua de consumo humano mediante técnicas no convencionales (artesanales).

Babu y Chaudhuri (2005) investigaron la remoción de turbidez e indicadores microbiológicos (coliformes fecales y bacterias heterotróficas) en aguas superficiales mediante el uso individual de dos coagulantes naturales (*Moringa oleífera* y *Strychnos potatorum*) combinados con un filtro lento de arena con un agua con condiciones iniciales de turbiedad (15-25 NTU) y coliformes fecales (280-500

NMP/100ml). Se observó que el agua tuvo mejor calidad estética y microbiológica después del tratamiento, ya que se encontraron turbiedades finales entre 0,3-1,5 NTU y coliformes fecales entre 5-10 NMP/100ml, demostrando su alto potencial de aplicabilidad en comunidades rurales de los países en vía de desarrollo.

García *et al.* (2014) propusieron el diseño de una planta de potabilización de agua a bajo costo para el abastecimiento de una población de 1000 habitantes, que incluyó a la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural, teniendo en cuenta datos obtenidos a nivel de laboratorio y de planta piloto de la aplicación de este coagulante a un agua real y sintética. La planta propuesta consistió principalmente en los siguientes procesos: de coagulación-floculación con *M. Oleífera*, filtración con filtro de arena y desinfección con hipoclorito de sodio; los cuales fueron seleccionados de acuerdo a los criterios de la metodología de Siew-Leng *et al.* (2012).

Zaman *et al.* (2016) estudiaron la combinación de la *Moringa oleífera* con un agente antibacteriano (polvo de concha de peregrino) para la potabilización a bajo costo de aguas de distintas fuentes superficiales. Para ello, mezclaron la semilla de la Moringa con el polvo de peregrino en proporción 2:1 durante 10 minutos, luego se filtró el agua 8 veces en una tela sari y también en un filtro lento de arena. Se encontró a través de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que el agua tratada resultó ser potable, los cuales no presentaron variaciones significativas mediante pruebas estadísticas. Adicionalmente, no se detectó ningún efecto citotóxico de los extractos empleados para la potabilización del agua, indicando que estos compuestos no afectan a la salud humana.

Timothy *et al.* (2014) examinaron la incidencia del tamaño del grano de arena sobre la arena biológica y cómo la combinación de filtros de arena y de luz ultravioleta (UV) afecta la calidad del agua potable. En esta investigación se varió el diámetro de los granos de arena de un filtro de arena, un control con diámetro máximo de 0,70 mm y otro variable (entre 0,70 y 2 mm), y se encontró que los resultados en la remoción de turbidez y *E. coli* no mostraron diferencias significativas entre los filtros de arena comparados. Posteriormente, el efluente fue envasado en botellas

plásticas y se expusieron a luz UV, en la que se obtuvieron remociones de *E. coli* mayores al 98%.

D'Alessio *et al.* (2016) realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar si un filtro lento de arena es eficiente para la potabilización de agua con alta carga bacteriana ($>10^5$ NMP/100ml). En este trabajo se emplearon dos unidades de filtro lento de arena y una unidad de luz UV para tratar el agua con altas cargas microbianas. Se confirmó que el tratamiento con el filtro lento de arena puede usarse en estos casos y la unidad de luz UV después del tratamiento con el filtro de arena es eficiente para la remoción constante de coliformes totales y *E. coli* hasta 10^5 NMP/100ml.

En resumen de los artículos revisados, se encontró que una serie de procesos para el tratamiento de agua en los hogares mejora la calidad del agua y que son necesarios. Como por ejemplo, la filtración mediante los filtros analizados en este estudio (de bioarena y de carbón activado) aunque son eficientes para la clarificación del agua, no remueven la totalidad de microorganismos patógenos, por lo que un tratamiento adicional de desinfección es pertinente en todos los casos. Por tanto, el tratamiento en los hogares, aunque es sencillo, requiere de varios procesos para la obtención de un agua segura para la salud humana. Los procesos evaluados en este trabajo fueron: coagulación-floculación (coagulantes naturales), filtración (filtro de bioarena y de carbón activado) y desinfección (mediante SODIS y lámpara UV), los cuales no han sido evaluados para el tratamiento de agua en el punto de captación de agua de los pueblos palafíticos estudiados, cuyo análisis servirá de base para la implementación de sistemas de tratamiento no convencional en el futuro.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar la eficiencia de potabilización de dos alternativas no convencionales de bajo costo para la potabilización del agua de consumo de los pueblos de palafitos Nueva Venecia y Buenavista de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM)

5.2 Específicos

- Evaluar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua en el punto de captación de agua y el tanque de distribución de agua a las viviendas de estudio.
- Identificar y seleccionar dos coagulantes naturales de la región caribe colombiana para la remoción de partículas contaminantes del agua para uso de consumo en el área de estudio.
- Determinar la concentración y el estado de presentación a ser usado del coagulante natural con mayor rendimiento en la remoción de las partículas suspendidas en el agua.
- Definir dos alternativas completas de tratamiento de bajo costo no convencional del agua previamente tratada con el coagulante seleccionado.
- Comparar el rendimiento de remoción de los diferentes procesos de filtración y desinfección propuestos mediante análisis estadístico.

6. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los conceptos fundamentales que definen el marco conceptual para la elaboración y comprensión del presente proyecto, como se define a continuación:

6.1 Calidad del agua

La calidad del agua se determina con base a la comparación de los parámetros físicos y químicos que se determinan en el agua con estándares de calidad de agua (Arriaza *et al.*, 2015), dependiendo el uso: doméstico, industrial, agrícola, de recreación, etc. La buena calidad de agua debe garantizarse en cada tipo de agua para evitar riesgos o afectaciones ligadas a procesos relacionados con el uso de la misma.

En el caso de calidad de agua para consumo humano, debe garantizarse que esté libre de patógenos, de determinadas concentraciones de contaminantes químicos, de desechos biológicos, entre otros; para evitar riesgos sanitarios en la propagación de enfermedades a causa del agua contaminada. En Colombia, la legislación que regula la calidad de agua potable es la Resolución 2115 del 2007, la cual incluye un programa de vigilancia y define la frecuencia y el número de muestras a analizar de acuerdo con el tamaño de la población de estudio (Peláez *et al.*, 2016).

Según las enfermedades que se generan por su consumo, la contaminación del agua potable puede dividirse en dos grandes categorías: (1) contaminación química, que se asocia con efectos crónicos de enfermedades como el cáncer, efectos neurológicos o efectos reproductivos; y (2) contaminación microbiológica, la cual provoca efectos agudos (enfermedades infecciosas como cólera, tifus, malaria, fiebre amarilla, síntomas gastrointestinales, etc.) (Villanueva *et al.*, 2001). Es por ello que se hace necesario la evaluación de la calidad del agua para tener información del estado de contaminación de esta con el objeto de tomar decisiones en cuanto al uso del agua.

La determinación de la calidad de agua de diferentes tipos de uso, incluyendo el de agua potable, se ha valorado mediante la evolución grupal o individual de variables físicas, químicas y biológicas (Ospina *et al.*, 2015). Existen organizaciones donde se definen los lineamientos para evaluar la calidad de agua potable (en Colombia existen tres Ministerios que conforman la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA): (1) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; (2) el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; y (3) Ministerio de Salud y Protección Social; siendo la CRA la entidad encargada de establecer los procedimientos para determinar la calidad de agua potable y realizarle seguimiento respectivo, así como de crear política que permita su cumplimiento en el territorio colombiano); así mismo normativas que definen los parámetros sugeridos para garantizar un uso sano para el consumo humano de agua.

6.2 Tratamiento no convencional de agua potable a bajo costo

Existen diferentes procesos convencionales para el tratamiento de agua potable, incluyendo: cribado, aireación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, desinfección, entre otros; los cuales son seleccionados mediante estudio de ingeniería que tiene en cuenta la calidad de agua de la fuente y las operaciones de tratamiento más adecuadas y económicas para el diseño de estos sistemas, dependiendo claramente de la calidad de agua cruda que se tenga. (Rojas, 2015).

6.2.1 Coagulación y coagulantes naturales

La fase de coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (Andía, 2000) citado en (Ramírez & Jaramillo, 2015) . Este proceso incide en la clarificación del agua y remoción de partículas suspendidas presentes en el agua, reduciendo su turbidez. Es un proceso que incluye floculación, en donde las partículas se aglomeran y se forman los llamados flocs.

Como alternativa, los países en vías de desarrollo, han adaptado una serie de tecnologías tradicionales para eliminar la turbidez del agua en el ámbito doméstico; para ello se han empleado coagulantes naturales, los cuales son extraídos a partir

de microorganismos, tejidos de plantas o animales, presentan las siguientes ventajas: (1) son biodegradables y seguros para la salud humana; (2) producen menos lodos que el empleo de coagulantes metálicos (alrededor del 20-30%); (3) son solubles en agua y actúan de modo similar a los coagulantes y desinfectantes sintéticos, ya que logran aglomerar partículas en suspensión contenidas en el agua cruda; (4) algunos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, que ayudan a reducir microorganismos capaces de producir enfermedades en la salud humana; y (5) los agentes coagulantes y floculantes naturales, principalmente polisacáridos, son considerados ambientalmente amigables en comparación con los agentes orgánicos e inorgánicos debido a su biodegradabilidad (Ramírez & Jaramillo, 2015; Antov *et al.*, 2012).

El uso de coagulantes a base de plantas para el tratamiento de aguas turbias se ha reportado desde hace varios milenios (Sanghi *et al.*, 2002), y hasta ahora, los científicos ambientales han podido identificar varios tipos de plantas para esta finalidad (Guzmán *et al.*, 2013). Se presume que el empleo de materiales naturales puede minimizar o evitar la importación de coagulantes químicos (Yin, 2010), los cuales han demostrado ser peligrosos para la salud humana.

Se ha identificado que la mayoría de los extractos naturales se derivan de semillas, hojas, cortezas, raíces y frutas, que son extraídos de plantas y árboles (Pritchard *et al.*, 2009). Los polímeros orgánicos naturales han sido usados por más de 4000 años en África, India y China como eficientes coagulantes y ayudantes de coagulación de aguas turbias para uso doméstico en áreas rurales (Asrafuzzaman *et al.*, 2011).

Los coagulantes poliméricos están asociados con dos mecanismos: (1) adsorción y neutralización de carga, y (2) adsorción y unión interparticular con estructuras de cadena larga, incrementando el número de sitios de adsorción desocupados; pues parece que estos dos mecanismos son los que proporcionan los principios básicos del funcionamiento interno de los coagulantes vegetales (Yin, 2010).

6.2.2 Sedimentación

La sedimentación es la operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad; en algunos casos, se denomina clarificación o espesamiento (Rojas, 2015; Arboleda, 2000).

6.2.3 Filtración

La producción de agua clara y cristalina es prerequisite para el suministro de agua segura y requiere la filtración. Aunque la coagulación y la sedimentación remueven cerca del 90% de la turbiedad y el color, una cierta cantidad de floc pasa el tanque de sedimentación y se necesita su remoción. Por ello, para lograr la clarificación final se usa filtración a través de medios porosos, que por lo general son arena o arena y antracita. (Rojas, 2015)

Los procesos de filtración pueden llevarse a cabo mediante sistemas a bajo costo, tales como: filtros lentos de arena, de carbón activado, hueso calcinado, entre otros (Rojas, 2015); los cuales son empleados principalmente en comunidades rurales con recursos económicos limitados.

La filtración es un proceso que consiste en permitir el paso de agua a través de materiales porosos (por ejemplo: arena, grava o tela) con el fin de retirar sólidos suspendidos o patógenos; es el segundo paso para el proceso de tratamiento de agua en hogares, que se realiza después de la sedimentación y antes de la desinfección (CAWST, 2009).

- Filtros lentos de arena y filtros de bioarena

El filtro lento de arena se utiliza principalmente para eliminar la turbiedad del agua, y si es bien diseñado y operado convenientemente puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua (CEPIS-OPS, 2001). Este sistema de filtración es uno de los más utilizados para el tratamiento de aguas superficiales cuya finalidad es el agua para consumo humano (Dizer *et al.*, 2004). Aunque en algunos casos este tipo de tecnologías es limitada para mejorar la calidad de agua potable dentro de las viviendas que pertenecen a comunidades que no tienen acceso a agua

potable, siendo entonces los filtros biológicos de arena una posibilidad de tratamiento de agua potable de fácil acceso (Elliott *et al*, 2008).

Por otra parte, existe una adaptación del filtro lento de arena, que es el filtro de bioarena (BSF) y se ha utilizado para el tratamiento de agua para las comunidades por casi 20,000 años. El filtro de bioarena es más pequeño y está adaptado para darle un uso continuo, lo cual lo hace muy apropiado para tenerlo en los hogares. El contenedor del filtro puede estar hecho de concreto o plástico, el cual se llena con capas de arena y grava especialmente seleccionada y preparada para este fin. (CAWST, 2009).

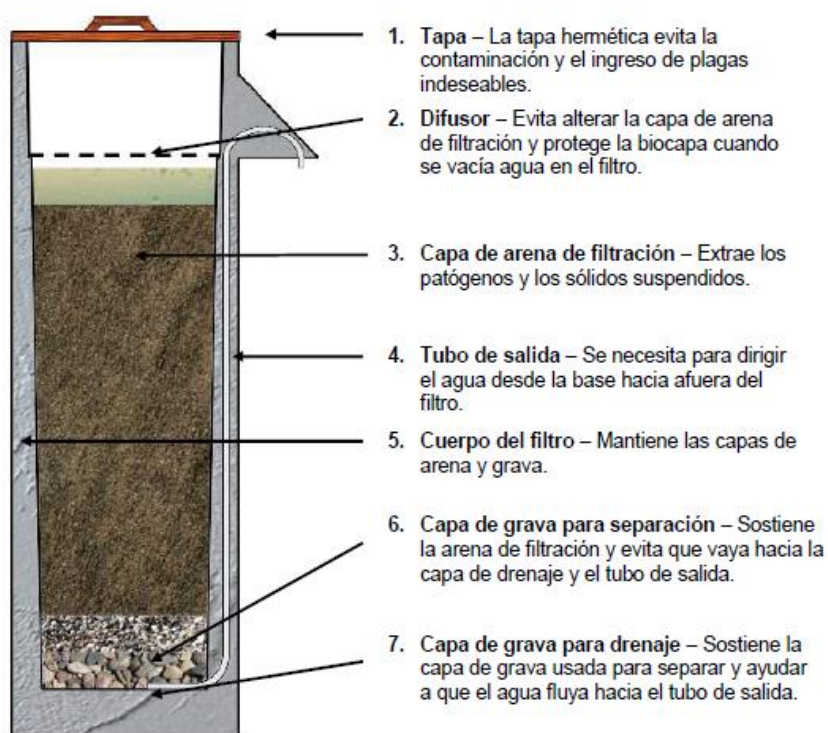


Figura 3. Componentes de un filtro de bioarena. Fuente: CAWST, 2009

Es muy frecuente que las personas se enfoquen en una tecnología que está dirigida mediante un solo paso del proceso, olvidándose que el tratamiento de agua debe considerarse como un todo (conjunto de procesos para la potabilización del agua); y aunque las tecnologías individuales como el filtro de bioarena pueden incrementar la calidad del agua de consumo humano, se debe considerar el proceso completo para obtener la mejor calidad de agua posible (CAWST, 2009).

CAWST (2009) propone el método de barreras múltiples, que consiste en cinco pasos como se muestran a continuación:

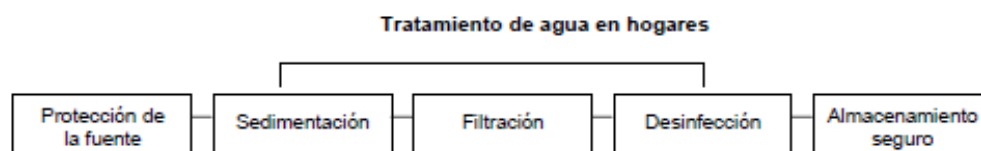


Figura 4. Pasos del método de barreras múltiples. Fuente: (CAWST, 2009)

Los cinco componentes del método de barreras múltiples ayudan a mejorar la calidad del agua de consumo humano en gran medida, por tanto, el proceso de filtración debe usarse con los otros componentes para poder obtener un agua sin riesgo para la salud humana (CAWST, 2009).

- **Filtros de carbón activado**

Cuando se usa carbón activado como medio filtrante, se trata de un filtro de carbón activado. El carbón activado es un sólido poroso que posee dos propiedades que lo hacen útil para el tratamiento de agua: (1) atrapa todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes con una efectividad tal que puede dejar un agua prácticamente libre de estos compuestos; y (2) destruye el cloro libre residual que no haya reaccionado durante el proceso de desinfección (Fombuena & Valentín, 2010), lo cual es muy importante para prevenir la formación de los trihalometanos en el agua de consumo humano.

El carbón activado tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en polvo como granular en medio líquido y gaseoso; entre las aplicaciones en medios líquidos puede emplearse para el tratamiento de agua potable, ya que elimina olor, color, sustancias químicas y bacterias (Fombuena & Valentín, 2010). Entre las sustancias químicas se reducen los compuestos hidrocarbonados clorurados, nitrobenzenos, aldehídos y alkanos (Lluíz, 2008), dado a estas propiedades importantes para la purificación de agua, casi todos los países desarrollados emplean carbón activado para el tratamiento de agua potable (Fombuena & Valentín, 2010).

6.2.4 Desinfección

Es importante tener presente que los procesos de potabilización incluyen varias etapas físicas y químicas, siendo la desinfección el paso final, en donde el objetivo es oxidar la materia orgánica remanente y destruir los microorganismos presentes (Juárez *et al.*, 2015).

Entre las tecnologías más usadas para el mejoramiento de la calidad microbiológica del agua para consumo humano se encuentran: ebullición del agua, desinfección solar (SODIS), radiación ultravioleta (UV), SODIS combinada con radiación UV, cloración y sistemas combinados (coagulación-filtración y desinfección). En cuanto a la implementación de tecnologías como la cloración, SODIS y radiación UV, sigue siendo un reto para el tratamiento de agua con elevada turbiedad; por lo que se requiere complementar estos sistemas con pretratamientos basados en la sedimentación o filtración de partículas, filtros de membrana, filtros de tela, filtros con medio granular, filtros cerámicos, filtros de arena, entre otros. (WHO, 2002)

La desinfección con cloro (cloración) es una de las utilizadas a nivel mundial, pero su dosificación requiere de mucho cuidado, ya que pueden formarse compuestos organoclorados conocidos como trihalometanos (cloroformo, bromoformo, etc.) en el agua tratada, que se presentan por la relación lineal entre las fracciones orgánicas existentes y el cloro inyectado (Panyapinyopol *et al.*, 2005), y se han identificado como carcinógeno en la salud humana (Arjona *et al.*, 2012); lo que puede resultar grave en comunidades rurales que no cuentan con las mediciones de las dosis de cloro aplicadas, así como el nivel de formación para este tipo de tratamiento. Es por ello que se han empleado otras técnicas más simples para la desinfección del agua, como lo es el caso de la desinfección solar (SODIS) y la radiación UV (lámparas).

- Desinfección con Luz UV (lámparas)

La radiación UV se encuentra en el espectro electromagnético entre los 100 y 400 nanómetros (nm); de 200-280 nm, se encuentra la radiación UV-C; de 280-315 nm, la UV-B; y de 315-400 nm, la UV-A (Baird & Cann, 2014).

La radiación UV-C tiene una aplicación muy importante en la eliminación de microorganismos presentes en el agua (desinfección), ya que se considera un método rápido, seguro y económico para dicha finalidad; su función es la de afectar el funcionamiento de las células y alterar su material nuclear o ADN, pues el organismo irradiado se inactiva y muere al perder su capacidad infecciosa o reproductiva (González *et al.*, 2009).

Existe un rango de longitud de onda que daña el ADN de la mayor cantidad de microorganismos en el agua, que se encuentra entre 250 y 270 nm; siendo considerada la de 254 nm la más efectiva, correspondiendo a rayos UV de onda corta (González *et al.*, 2009).

- Desinfección con SODIS

La desinfección solar (SODIS) es una tecnología simple y de bajo costo para la desinfección del agua potable, que implica llenar botellas de plástico con agua sin tratar y luego exponerlas al sol; en el caso de un agua turbia, debe ser filtrada previamente, y las botellas se colocan en techos de teja de zinc expuestos a la luz del sol (Halperin *et al.*, 2011). Los tiempos de exposición varían de 6 a 48 h dependiendo de la intensidad de la luz solar y la sensibilidad de los patógenos (McGuigan *et. al*, 2012).

El fundamento de este método de desinfección de agua a bajo costo, se basa en la combinación del aumento de la temperatura del agua y la radiación UV-A que destruye o inactiva los patógenos que están presentes en el agua (McGuigan *et al.*, 1999). SODIS se conoce de hace más de 30 años y se ha demostrado repetidamente que es eficaz para eliminar microorganismos patógenos y reducir la morbilidad diarreica incluyendo el cólera (McGuigan *et. al*, 2012).

7. METODOLOGÍA

7.1 Área de estudio

El área de estudio comprende dos corregimientos de Sitio Nuevo: Nueva Venecia (10°49'N; 74°34'O) y Buenavista (10°50'N; 74°30'O) ubicados en la Ciénaga de Pajarales o Complejo Pajarales (CP), contigua a la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM). La CGSM es conocida también como llanura deltaica del río Magdalena, se extiende desde el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta hasta el río Magdalena (Garay *et al.*, 2004). Este sistema lagunar debido a sus características ecológicas, hidrológicas y geomorfológicas es uno de los sistemas costeros más productivos del trópico (Cancio *et al.*, 2006).

El clima de esta zona de estudio es tropical árido, el cual cuenta con dos periodos climáticos mayores: seco (diciembre-mayo) y lluvioso (junio-noviembre) y la temperatura promedio es de 30°C (Cancio *et al.*, 2006; Narváez *et al.*, 2008; Zamora *et al.*, 2007). En Nueva Venecia hay aproximadamente 300 casas, mientras que en Buenavista 150 viviendas. Estos dos pueblos se encuentran a una distancia de 15 minutos en chalupa, estando el pueblo más cercano (Nueva Venecia) al casco urbano de Sitio Nuevo (Magdalena) a 40 minutos en lancha.

La ruta de ingreso de agua potable va desde el Caño de Aguas Negras (parte noroeste del municipio de Sitio Nuevo) hasta los pueblos palafíticos: Nueva Venecia y Buena Vista.



Figura 5. Área de estudio: Ubicación de pueblos palafíticos y las rutas de ingreso de agua potable en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Fuente: Modificado Google Earth

7.2 Diseño metodológico

Esta investigación se desarrolló en 3 etapas: la evaluación de la calidad del agua, la determinación de coagulantes naturales y la determinación de las alternativas de bajo costo para el tratamiento.

7.2.1 Evaluación de la calidad del agua

Se realizó el monitoreo de la calidad del agua en el punto de captación de agua para consumo (caño de Aguas Negras) y en un tanque de almacenamiento de agua (1000 L) donde se trata con sulfato de aluminio y se distribuye a la comunidad

palafítica. El análisis de la calidad de agua de estos dos puntos de muestreo tuvo dos finalidades: (1) para conocer las condiciones iniciales del agua cruda a tratar, así como su variación en la época húmeda del primer semestre del año; y (2) comparar la calidad del agua que se distribuye a las dos poblaciones palafíticas con la de la fuente abastecedora de agua (caño Aguas Negras). Las muestras fueron recolectadas en dos muestreos: el 23 de marzo (primer muestreo) y el 26 de abril de 2017 (segundo muestreo).

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de agua definidos por Standard Methods For Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1995) que son: Temperatura, conductividad, pH, alcalinidad, dureza total, turbiedad, color, cloruros, sulfatos, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales. En la siguiente tabla se especifican los métodos empleados para las determinaciones en laboratorio:

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en laboratorio

Parámetro	Método analítico
Temperatura	Electrométrico
pH	Electrométrico
Conductividad	Electrométrico
Turbiedad	Nefelométrico
Color	Espectrofotometría
Alcalinidad	Volumétrico
Dureza total	Volumétrico
Cloruros	Complejométrico
Sulfatos	Espectrofotometría
Nitratos	Espectrofotometría
Coliformes totales	Filtración por membrana
Coliformes fecales	Filtración por membrana

Adicionalmente, se aplicó una encuesta de manera aleatoria a 20 personas de diferentes hogares en Nueva Venecia y a 18 en Buenavista. El objeto de la encuesta fue evaluar la percepción de los habitantes sobre la calidad del agua que consumen, así como su interés por adoptar técnicas descentralizadas y sencillas para la purificación de agua.

7.2.2 Determinación de coagulantes naturales locales para el proceso de coagulación

Una vez evaluada la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua, se emplearon dos coagulantes naturales procedentes de semillas de árboles que se encuentran en la costa Caribe y que han resultado eficaces para la aglomeración de partículas del agua: *Moringa oleífera* (Moringa) y *Cassia fistula* (Lluvia de oro o Cañadonga), utilizados potencialmente para remover material suspendido del agua cruda (agua de la fuente de agua superficial: Caño Aguas Negras); posteriormente se empleó un diseño experimental que permitió encontrar las óptimas dosis y tiempos de mezcla rápida para la remoción de partículas suspendidas en el agua.

El diseño experimental fue elaborado y desarrollado por el autor de esta investigación teniendo en cuenta alternativas a bajo costo para la purificación del agua mediante la revisión bibliográfica, el cual consistió en evaluar por duplicado los parámetros físicos: turbiedad y color, antes y después de aplicar los respectivos coagulantes naturales por muestra analizada. Estos coagulantes, se aplicaron variando sus concentraciones para determinar la dosis óptima de clarificación del agua cruda de la fuente de estudio. Así mismo variando el tiempo de mezcla rápida (agitación rápida) de la muestra con el respectivo coagulante aplicado.

Las concentraciones que se emplearon para encontrar la dosis óptima de *C. fistula* fueron de 10, 15, 20 y 25 mg/L como algunas de las utilizadas por Guzman *et al.* (2015) en una fuente de agua superficial con alta turbiedad; y en cuanto a la Moringa se emplearon concentraciones de 50, 100, 150 y 200 mg/L, que fueron establecidas teniendo en cuenta el rango de concentraciones reportadas por Babu & Chaudhuri (2005).

Para la obtención de los coagulantes se realizaron tres pasos:

-Trituración y tamizado de las semillas: Las semillas de Moringa fueron pelada y triturada mediante un mortero de laboratorio, y la de Cañadonga mediante un molino especial para semillas, luego cada uno de estos productos fueron tamizados por separado obteniendo un polvo fino que fue almacenado en respectivas bolsas Ziploc para evitar la absorción de humedad.

-Extracción del compuesto activo: El compuesto activo de los coagulantes se extrajo teniendo en cuenta el proceso descrito por Yin (2010), pero a diferencia de este no se usó agua destilada, sino el agua cruda de río filtrada con el biofiltro. Para ello, se adicionaron 10g de polvo de cada coagulante en 1 L de agua filtrada envasada en botella plástica, respectivamente para cada coagulante, obteniendo una solución de 10g/L (10000 mg/L). En la siguiente Figura se muestran las botellas de agua antes y después del proceso de coagulación:

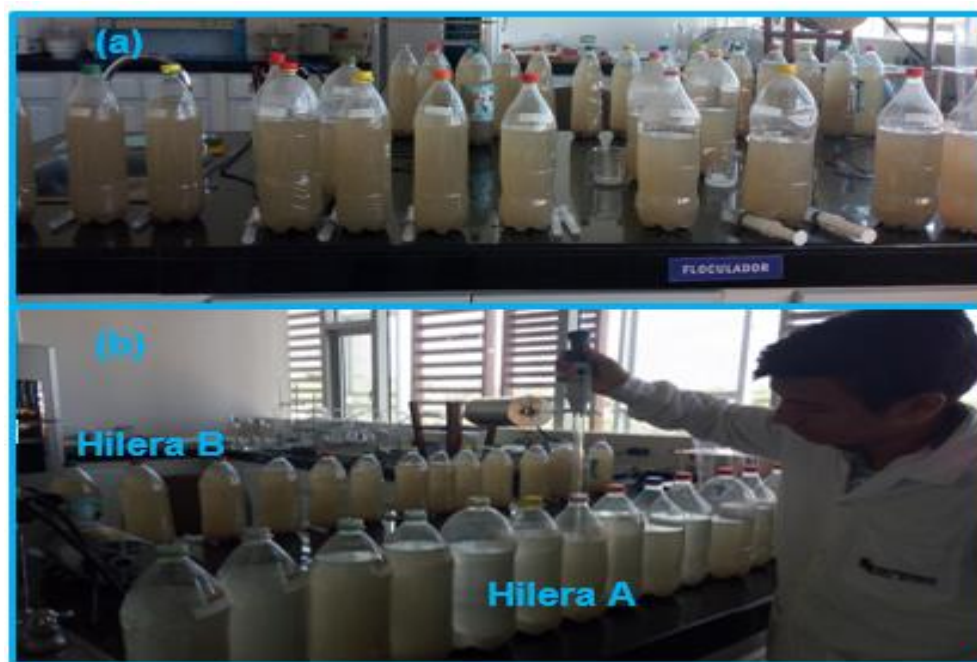


Figura 6. Prueba de coagulación. (a) Muestras de agua antes de aplicar los coagulantes. (b) Muestras después de aplicar el coagulante cumplido el tiempo de sedimentación; en la Hilera A, usando Moringa, y en la Hilera B, Cañandonga

-Dilución de la muestra inicial: A partir de la concentración inicial de cada coagulante se dosificaron las concentraciones requeridas para las pruebas en botellas plásticas de 2 L mediante una dilución de la solución inicial (10000 mg/L).

Luego de obtener las concentraciones requeridas de cada uno de los coagulantes por cada concentración de coagulante, se agitaron rápidamente (mezcla rápida) dos recipientes plásticos de 2 L en un tiempo de 1 y 2 minutos, respectivamente. Luego se agitaron un poco más lentamente (mezcla lenta) durante 5 minutos y finalmente se dejaron reposar en un tiempo de 2 horas con el fin de que las partículas del agua

sedimenten. Tanto la mezcla rápida como la lenta fueron llevadas a cabo de manera manual con la ayuda de un grupo de estudiantes voluntarios de la Universidad del Norte, que fueron capacitados para realizar el mezclado en la misma forma, tiempo y frecuencia. La forma como se llevó a cabo la mezcla del coagulante en el agua fue realizada mediante movimientos homogéneos de arriba-abajo y abajo-arriba para obtener una disolución completa del compuesto natural.

Una vez culminado el tiempo de reposo, se procedió a medir la turbiedad y color cada 30 minutos hasta completar las 2 horas de tiempo de sedimentación en cada una de las muestras. Estos análisis de laboratorio se llevaron a cabo mediante dos muestreos en los días 4 y 16 del mes de mayo de 2017, periodo en el que comenzaron las precipitaciones del primer semestre del año.

A continuación, en la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo del proceso de coagulación descrito con anterioridad:

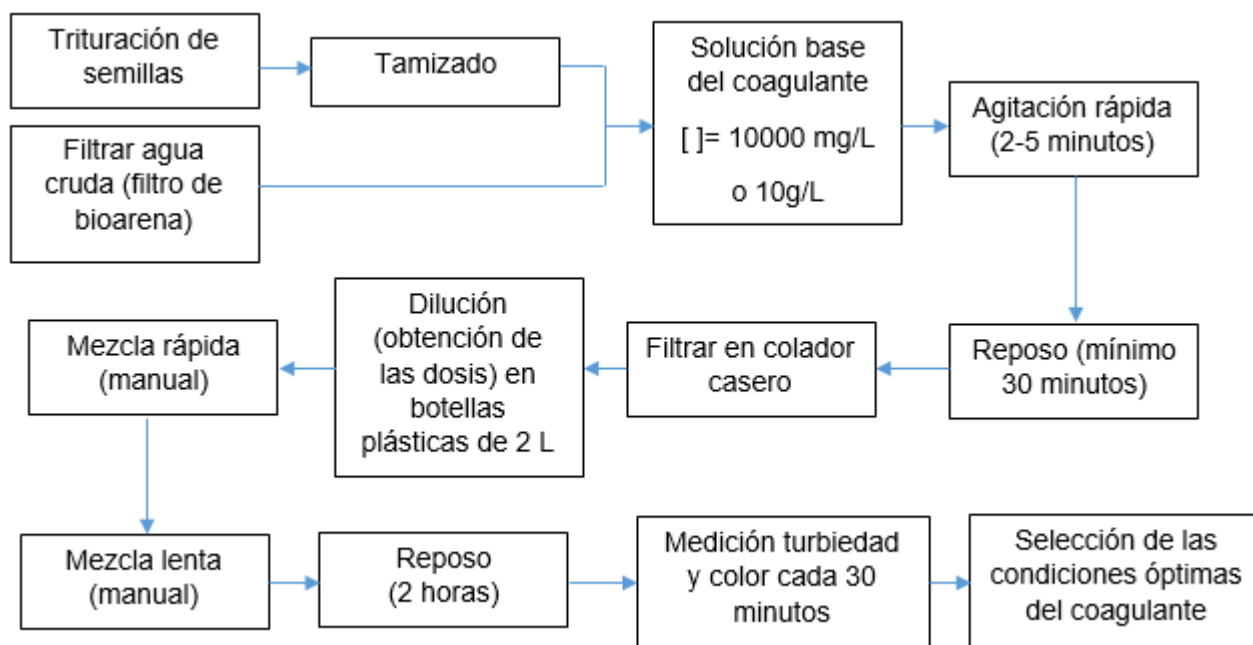


Figura 7. Esquema del proceso de obtención de coagulantes

La turbiedad se determinó por el método nefelométrico y se expresó en unidades nefelométricas de turbidez (UTN), mientras que el color se evaluó por el método espectrofotométrico y los resultados se midieron en unidades de platino-Cobalto (UPC).

7.2.3 Determinación de alternativas a bajo costo de procesos de filtración y/o desinfección

Realizada la prueba de coagulación en todos los muestreos, para cada coagulante estudiado se escogió el coagulante con mejor rendimiento en la remoción de partículas; posteriormente se realizó un proceso de filtración mediante dos matrices de filtración caseras (filtro lento de bioarena y filtro de carbón activado) sin aplicar desinfección. También se aplicó la filtración mediante estos dos filtros con un control, agua cruda sin emplear coagulantes para observar el rendimiento de estos por si solos. Las descripciones de los dos filtros se muestran en: la Figura 8 el de bioarena y en la Figura 9, el de carbón activado.

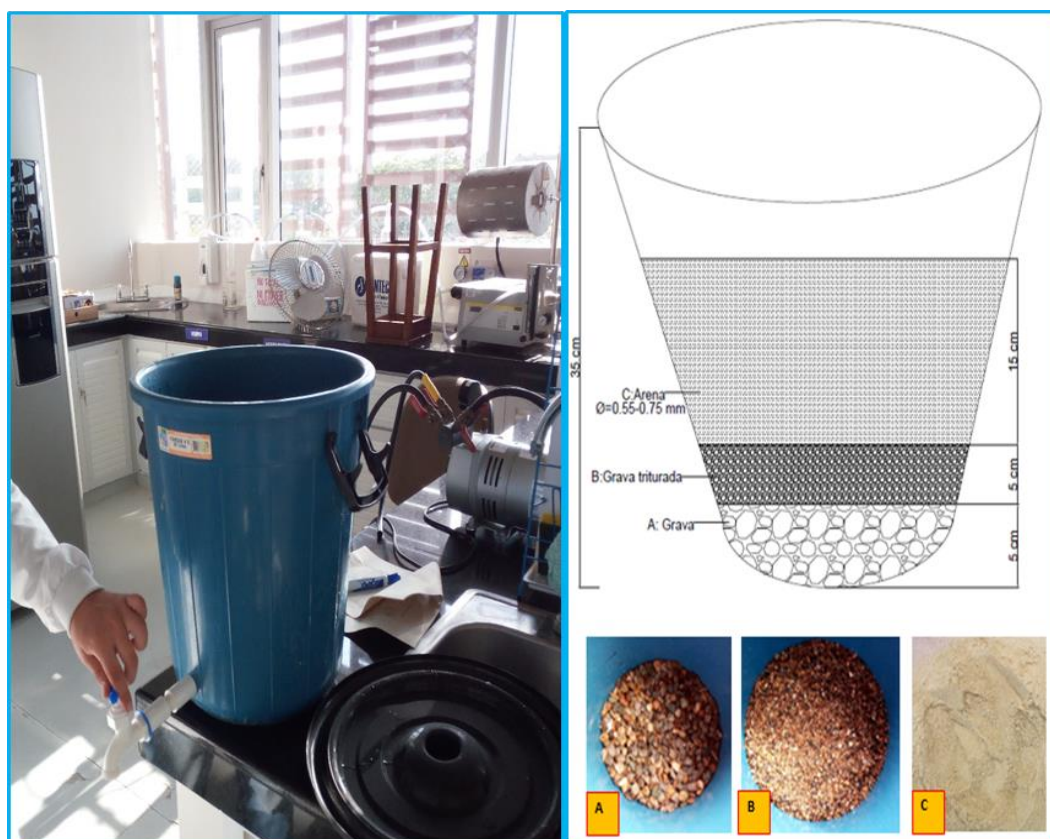


Figura 8. Filtro de bioarena

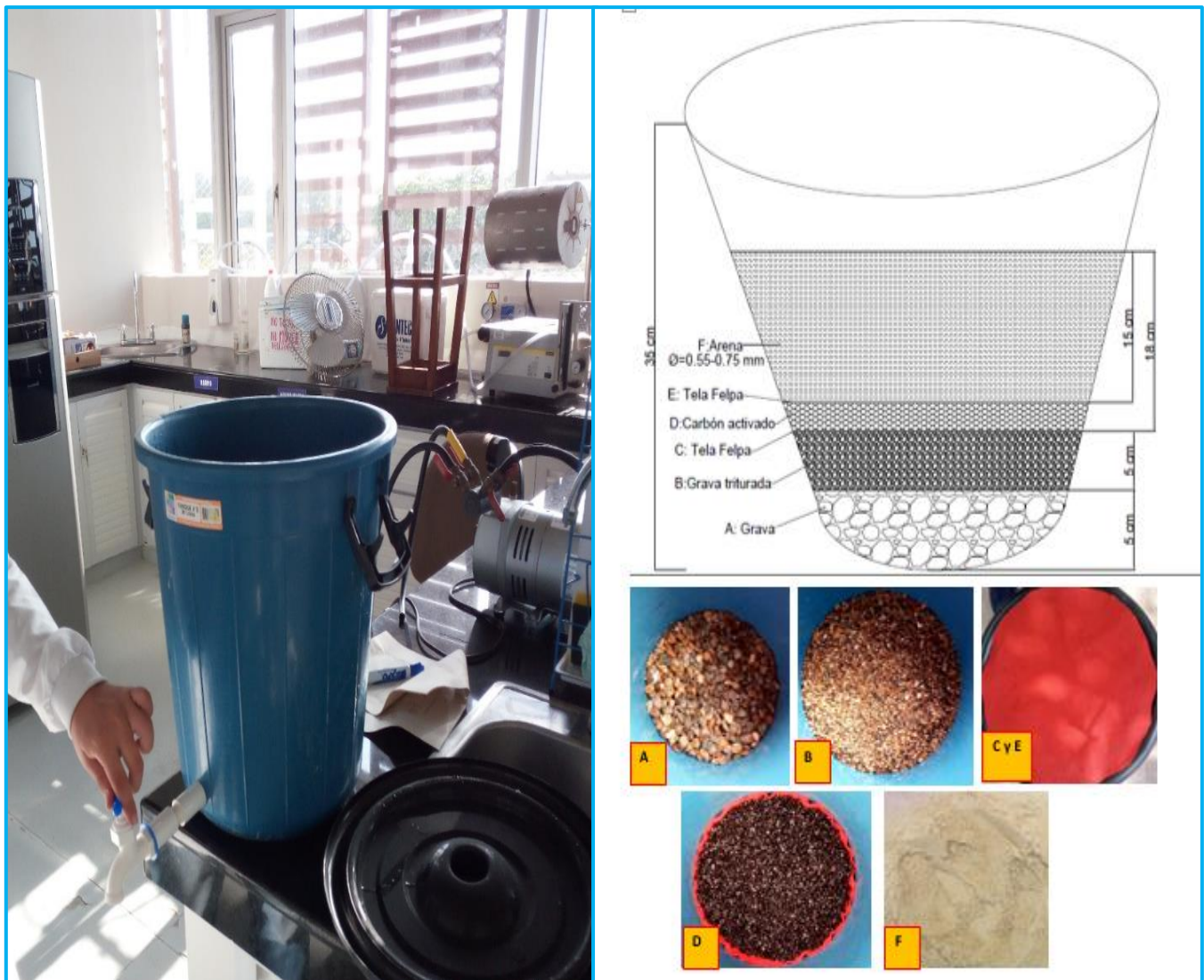


Figura 9. Filtro de carbón activado

Adicionalmente se emplearon dos procesos de desinfección a bajo costo que se combinar con los dos filtros propuestos: el método de desinfección solar (SODIS) y el de desinfección con luz UV (lámpara UV), con el objeto de comparar todos los procesos de adsorción sin desinfección y con desinfección. La lámpara UV marca CREATOR, modelo GPH150T5L, fue obtenida en un local comercial de ventas de productos de tratamiento de agua, junto con un cargador y un tubo protector de cuarzo. Los complementos de la lámpara fueron instalados en un tubo PVC de 3" de diámetro y 20 cm de largo, el cual fueron sellados con tapones de 3" y se

realizaron orificios de $\frac{1}{2}$ " de entrada y salida de agua, colocando un control de agua la salida (Ver Figura 10).



Figura 10. Dispositivo de radiación UV

La eficiencia del proceso de filtración se evaluó midiendo los parámetros de calidad de agua descritos en el numeral 7.2.1 una vez filtrada la muestra de agua comparándolos con los parámetros fisicoquímicos medidos inicialmente del agua cruda (parámetros control). Mientras que la eficiencia de los procesos de desinfección se determinó evaluando la calidad microbiológica mediante la determinación de los coliformes totales y fecales como se definieron anteriormente. Con base a la remoción de los parámetros de calidad de agua evaluados se determinó por medio de comparación de medias (test de ANOVA simple o Kruskal-Wallis, dependiendo del cumplimiento de los supuestos del ANOVA) cuál de los dos filtros o técnicas de desinfección empleadas logró obtener el promedio de los niveles medidos de los parámetros analizados más bajos. Para ello se usó el software Statgraphics centurion XV.

En la Tabla 2 se resume las cantidades de muestras analizadas por cada parámetro de calidad de agua, en las cuales se incluyen las muestras por duplicado:

Tabla 2. Cantidad de pruebas realizadas en laboratorio de la investigación

Parámetro	Punto de muestreo						Total
	Caño Aguas Negras	Tanque de almacenamiento	Caño Aguas Negras	Tanque de almacenamiento	Caño Aguas Negras	Caño Aguas Negras	
	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	Muestreo 4	
pH	2	2	2	2	14	14	36
Temperatura	2	2	2	2	14	14	36
Conductividad	2	2	2	2	14	14	36
Alcalinidad	2	2	2	2	14	14	36
Dureza total	2	2	2	2	14	14	36
Cloruros	2	2	2	2	14	14	36
Sulfatos	2	2	2	2	14	14	36
Nitratos	2	2	2	2	14	14	36
Coliformes totales	2	2	2	2	38	38	84
Coliformes fecales	2	2	2	2	38	38	84
Turbiedad	2	2	2	2	142	142	292
Color	2	2	2	2	142	142	292

En la Figura 11 se ilustra el diagrama de los procesos llevado a cabo en el laboratorio para el tratamiento no convencional de agua potable de los pueblos palafíticos de estudio. En esta figura pueden observarse los parámetros de calidad de agua medidos durante cada proceso, así como las variables de la variación de los dos coagulantes empleados (concentración, tiempo de mezcla rápida y lenta, y tiempo de sedimentación) y la combinación de las técnicas aplicadas durante la secuencia de procesos para la potabilización no convencional.

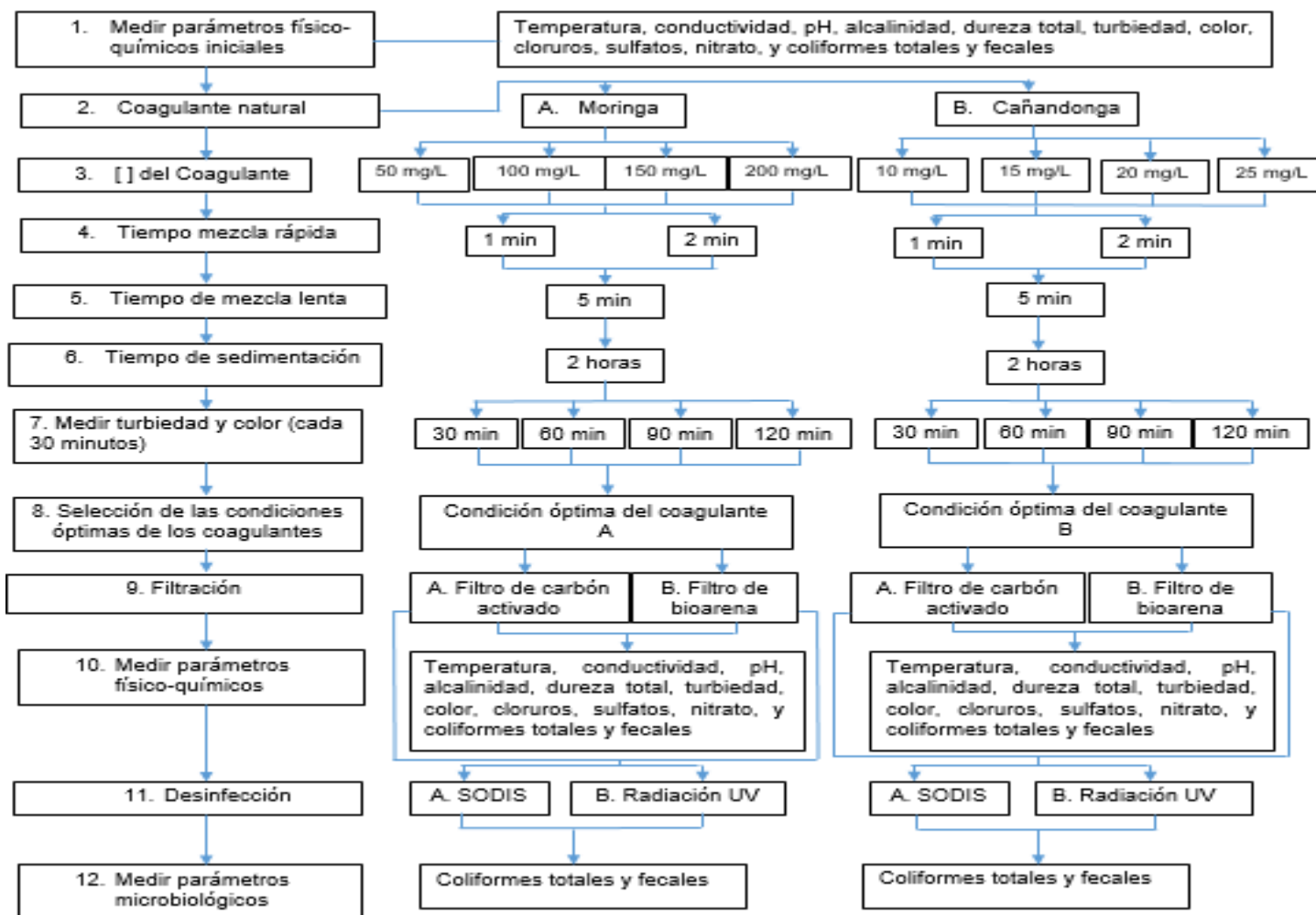


Figura 11. Diagrama de la metodología empleada para la potabilización no convencional

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 Etapa 1: Evaluación de la calidad del agua

Los resultados obtenidos del análisis de la calidad de agua tomada en la fuente de agua superficial y en el tanque de distribución de agua (tanque de almacenamiento) de los pueblos palafíticos estudiados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros evaluados de la calidad de agua en la fuente de agua y sitio de distribución de agua de los palafíticos.

Parámetro	23/03/2017		26/04/2017		4/05/2017	16/05/2017	Norma colombiana (agua potable) 2115/2007
	Caño Aguas Negras	Tanque de almacenamiento	Caño Aguas Negras	Tanque de almacenamiento	Caño Aguas Negras	Caño Aguas Negras	
pH	7.22	7.16	7.18	7.23	7.12	7.43	6.5-9
Temperatura (°C)	25.1	26.7	27.5	27.8	29.8	28.1	N/A
Conductividad (μS/cm)	174	188.1	234	208	345	205	1000
Color (UPC)	370.96*	16.38*	378*	18.3*	375*	388.7*	15
Turbiedad (UNT)	633*	17.4*	650*	19.1*	645*	662*	2
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	71.6	52.8	85.8	61.8	65.4	52.8	200
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	346.6*	332.8*	276.2	248.6	357.8*	330.8*	300
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	42.54	60.97	49.63	56.72	61.68	42.54	250
Sulfatos (mg/L)	27	29	33	36	58	57	250
Nitratos (mg/L)	0.7	0.6	1.6	1.4	2.1	1.3	10
Coliformes totales (UFC/100 ml)	6700*	203*	8530*	122*	12100*	13700*	0
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	1600*	30*	1800*	14*	1700*	1000*	0

[*]: Incumplimiento del parámetro de calidad de agua según la Resolución 2115/2007

En esta tabla se presentan los datos obtenidos de los parámetros de calidad de agua analizados en cuatro muestreos. En los dos primeros muestreos (23/03/2017 y 26/04/2017) se evaluaron los parámetros en la fuente de agua superficial donde se capta el agua (caño Aguas Negras) y en el tanque de almacenamiento donde se distribuye el agua a los dos pueblos palafíticos (Nueva Venecia y Buenavista); mientras que en los otros dos muestreos (4/05/2017 y 16/05/2017) correspondieron al análisis de la calidad de agua antes de realizar el tratamiento propuesto (muestra inicial) para el agua del caño Aguas Negras. Adicionalmente, se indican los límites

permisibles de la norma colombiana de calidad de agua potable (Resolución 2115/2007), la cual aplica únicamente para el agua tratada en el tanque de almacenamiento. Teniendo en cuenta los resultados, se observa que el agua del caño de Aguas Negras es un agua con turbiedad alta, oscilando entre 633 y 662 UNT, y que dicha variación puede ser debido al efecto de las precipitaciones, ya que donde se presentó el valor más alto fue en la época húmeda (evento de precipitación) en la cuenca del caño Aguas Negras, dicho evento causa erosión en la cuenca aumentando el transporte de sedimentos de este cuerpo de agua. Sin embargo, esta suposición no es totalmente cierta porque el efecto del uso del suelo, como por ejemplo: la deforestación y el uso del cultivo pueden incidir también en las tasas de transporte de sedimentos, como pudo concluirse en el estudio realizado por Restrepo & Escobar (2016), en el que encontró que el cambio climático (aumento de precipitaciones) no fue únicamente el que contribuyó en el incremento de las tasas de transporte de sedimentos, si no que la deforestación fue el factor más importante que produjo este aumento. Pero determinar estos cambios debido al uso del suelo y cambio climático es complejo (Gomez *et al.*, 2009) y para ello se requieren estudios, que no hacen parte de los objetivos de este trabajo, como los realizados por Restrepo & Escobar (2016); He *et al.* (2016) y Tang *et al.* (2012); pueden emplearse herramientas como la modelación (Herrero *et al.*, 2017); análisis paleo-ambiental a través del análisis de núcleo de sedimentos (Marrero *et al.*, 2014) y análisis de tendencias multianuales de datos medidos en estaciones (Zhao *et al.*, 2015).

El incremento de las tasas de transporte de sedimentos puede causar efectos negativos a los cuerpos de agua porque las partículas de sedimento pueden contener contaminantes (como por ejemplo: pesticidas y plaguicidas) e incluyendo microorganismos (Yao & Xu, 2013), que también son arrastrados por la escorrentía superficial y subsuperficial (Schreiber *et al.*, 2015), lo que posiblemente puede explicar el incremento de las concentraciones microbianas, en la que los coliformes totales variaron de 6700 UFC/100ml (en época seca) a 13700 UFC/100ml (en época lluviosa), ya que existe asociación entre la precipitación y la contaminación microbiológica en cuerpos de agua (Brownell *et al.*, 2007).

Por otro lado, el tratamiento de agua llevado a cabo por el distribuidor de agua, que se basó en el uso del sulfato de aluminio y cloración en un tanque de 1000 L expuesto al aire libre, no fue lo suficiente para dejar el agua apta para consumo humano aunque obtuvo alta remoción de turbiedad, coliformes totales y fecales con eficiencia promedio de 97%, 98% y 99%, respectivamente. Sin embargo, es importante reiterar que se requieren tratamientos que impliquen un conjunto de procesos y que tengan en cuenta el uso de sustancias no tóxicas (como por ejemplo: coagulantes naturales) ya que sustancias como el cloro y el sulfato de aluminio, que son usados en el tratamiento de agua de los pueblos palafíticos, pueden ocasionar los problemas de salud que se han descrito en secciones anteriores de este trabajo. El uso de estas dos sustancias puede explicar el incremento de los niveles de cloruros y sulfatos del agua tratada en el tanque de almacenamiento en comparación con los del agua sin tratar del caño Aguas negras.

8.1.1 Encuesta aplicada a los habitantes de los dos pueblos palafíticos

Las preguntas que se les realizaron a los habitantes de diferentes hogares en los dos pueblos estudiados estuvieron basadas básicamente en la percepción que tienen sobre la calidad del agua que consumen y su relación con las enfermedades relacionadas con el uso de agua para consumo humano, su grado de conocimiento sobre técnicas descentralizadas de purificación de agua y su aplicación en sus respectivos hogares, sus actitudes para recibir capacitaciones para el tratamiento de agua en casas, y la gestión del agua residual.

En los dos pueblos estudiados se encontró que todos los encuestados consideraron lo siguiente: que el consumo directo del agua de río podría ocasionar enfermedades; estarían dispuestos a recibir capacitación para potabilizar agua en el hogar, así como a tratar el agua sin ningún tipo de restricción relacionada con creencias y/o aspectos culturales; creyeron necesario realizar inversiones para la potabilización del agua; y que el agua de desperdicio de cocina y de baño se vierte directamente al complejo cenagoso.

De acuerdo con las anteriores respuestas relacionadas con el agua de consumo humano, se hace pertinente realizar proyectos para la gestión del agua potable de

dichos pueblos por dos razones principales: obviamente por la necesidad de la población en consumir agua potable; disponibilidad y actitud de las personas para adoptar técnicas descentralizados de potabilización de agua, sin que haya impedimento moral, religioso y/o cultural para la implementación de estos sistemas, siendo este último un aspecto muy importante a tener en cuenta ya que todo proyecto debe respetar las costumbres y comportamientos de las sociedades (Conesa, 2003).

En la Tabla 4 se resumen los resultados de las demás preguntas del cuestionario aplicado en campo:

Tabla 4. Percepción y gestión del agua de consumo de los habitantes de los pueblos palafíticos, en porcentaje (%).

Pregunta	Pueblo			
	Nueva Venecia		Buenavista	
	Si	No	Si	No
¿Considera que el agua que consume le ha ocasionado problema de salud (enfermedades)?	95,00	5,00	77,78	22,22
¿Cree que el agua que consume es de buena calidad?	0,00	100,00	5,56	94,44
¿Utiliza algún tipo de tratamiento para el agua que consume?	80,00	20,00	44,44	55,56
¿Sabe que el agua puede tratarse de forma casera?	90,00	10,00	83,33	16,67
¿Ha recibido capacitación sobre temas de prevención de enfermedades relacionadas con el agua?	50,00	50,00	50,00	50,00
¿Ha recibido donaciones para tratar el agua por parte del gobierno u otras organizaciones?	35,00	65,00	27,78	72,22
¿Le hace tratamiento al agua que usa para baño?	40,00	60,00	11,11	88,89
¿Le hace tratamiento al agua que usa para cocina?	70,00	30,00	22,22	77,78

Otro aspecto a resaltar es que en estos dos pueblos la mayoría de las personas piensan que el agua que consumen requiere de tratamiento, debido a que la consideran de mala calidad porque han padecido enfermedades que las relacionan con el consumo de agua. De manera general, los síntomas que más han percibido son los siguientes: diarrea, vómito, dolor de estómago y fiebre; siendo la diarrea la enfermedad más frecuente, la cual puede estar relaciona principalmente con la falta

de agua potable, la carencia de servicios de alcantarillado y aseo (CEP, 2011). Aunque el consumo de agua potable no es el único causante de la diarrea, si es el factor más crítico, como se evidencia en las exigencias de normas de calidad microbiológica de agua, como por ejemplo: La OMS establece que el agua de consumo humano debe tener ausencia de indicadores microbiológicos, como E. Coli, coliformes totales y fecales. Por tanto, es importante que las sociedades en el mundo consuman el agua sin la presencia de microorganismos patógenos.

Aunque muchos de los encuestados en ambos pueblos contestaron en la encuesta que si conocen técnicas de tratamiento de agua que podrían implementarse a bajo costo en los hogares, como: la cloración, cloración más la desinfección solar (SODIS), calentamiento (hervir agua), filtros de membrana (comerciales) y de tela, no se tiene un enfoque integrado para la potabilización del agua al no conocer y emplear una serie de procesos consecutivos para este fin, ya que se evidenció en la encuesta que las técnicas que usan estas comunidades para tratar el agua sólo abarcan un proceso de tratamiento de agua; lo cual es insuficiente, pues un agua turbia con presencia de microorganismos patógenos como la de la fuente de agua donde captan el agua (Caño de Aguas Negras) (Ver Tabla 3), se requiere de una serie de procesos que permitan la remoción de contaminantes que pueden estar en las partículas disueltas de esta fuente superficial de agua estudiada.

Por otro lado, en algunos de los hogares que se visitaron para la encuesta se encontraron filtros de modelo LifeStraw Family que estaban fuera de uso, lo que evidencia que no hay un programa constante y completo de entrega de estas tecnologías de membrana para todas las viviendas, ni mucho menos de seguimiento y control de su funcionamiento; por lo que se requiere implementar un sistema de tratamiento descentralizado a bajo costo, accesible de fácil operación y mantenimiento, así como la capacitación a los habitantes de estas dos comunidades rurales.

8.2 Etapa 2: Determinación de coagulantes naturales locales para el proceso de coagulación

Con el objeto de determinar cuál de los dos coagulantes naturales evaluados (Moringa y Cañandonga) fue el que obtuvo mayor eficacia de remoción de sólidos suspendidos y cuáles los parámetros óptimos de uso para cada coagulante (concentración y tiempo de mezcla rápida), se presentan los resultados en las gráficas de variación de turbiedad y color vs condiciones del coagulante y de porcentaje de remoción de turbiedad y color (Figuras 12, 13 y 14). En la Figura 12 se observa el comportamiento de la variación de la turbiedad y color (Eje Y) contra el tiempo de sedimentación (Eje X) de los dos ensayos realizados en laboratorio. En esta Figura el tiempo cero (0) indica el valor de la muestra inicial (justo antes de aplicar las dosis de los coagulantes) y luego se realizaron mediciones cada 30 minutos hasta completar 120 minutos. Para entender la Figura 12 (a, b, c y d) es importante aclarar las codificaciones que se usaron para identificar los coagulantes son: Se usa una letra seguida de un primer número, luego un guion y finalmente un número; en donde la letra indica el coagulante, [M] para Moringa y [C] para Cañandonga; el primer número representa la concentración del coagulante; y el segundo número el tiempo de mezcla rápida, 1 (un minuto) y 2 (2 minutos) de agitación rápida. En las Figuras 13 y 14, se muestra el porcentaje respectivo de remoción de turbiedad y color de la muestra de agua cruda del punto de captación de agua, caño Aguas Negras.

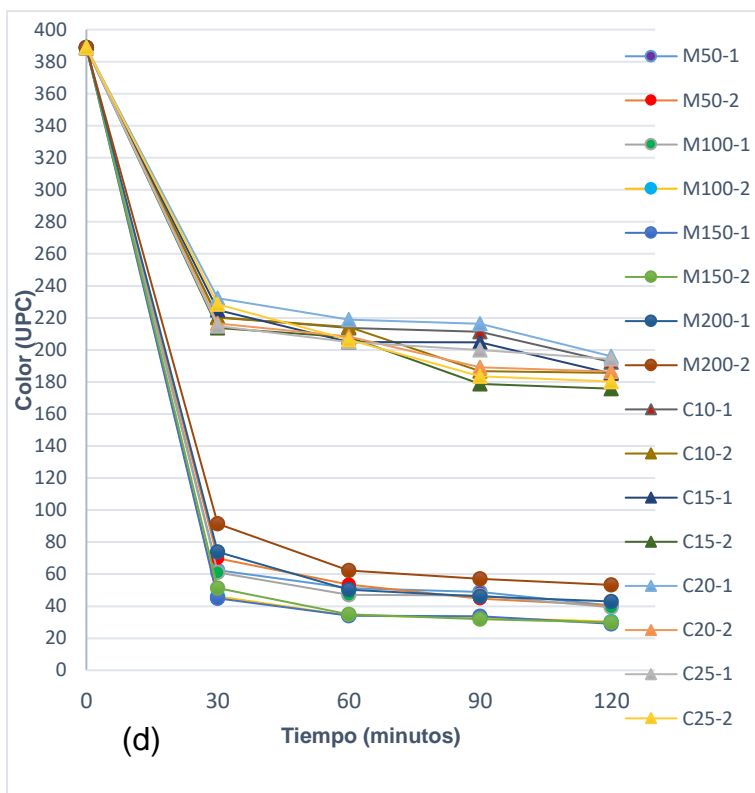
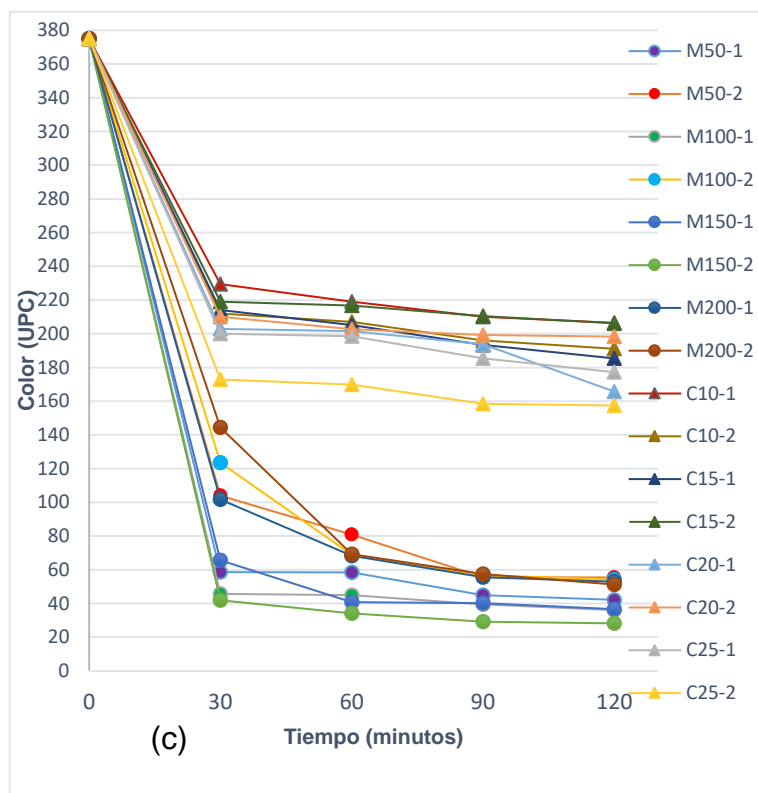
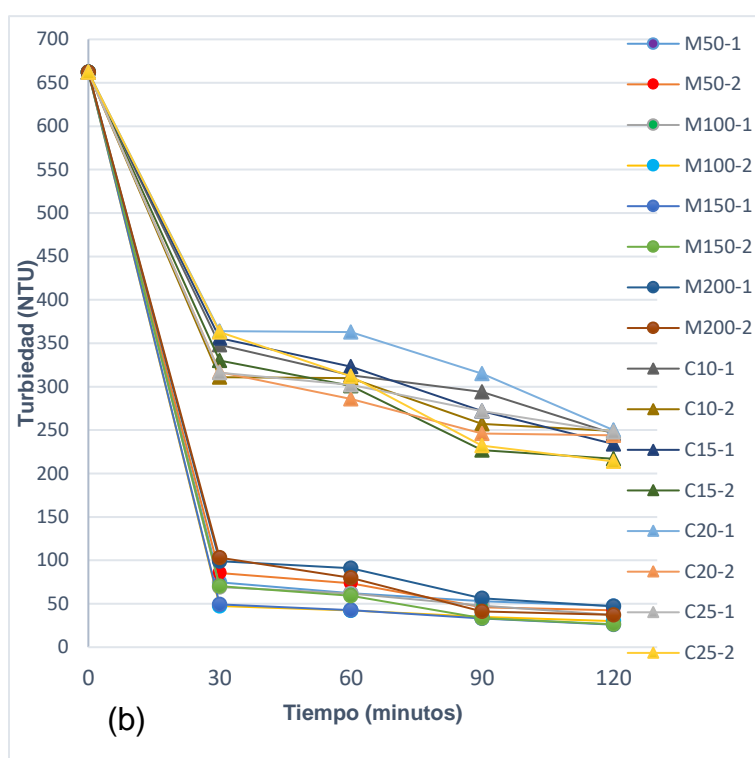
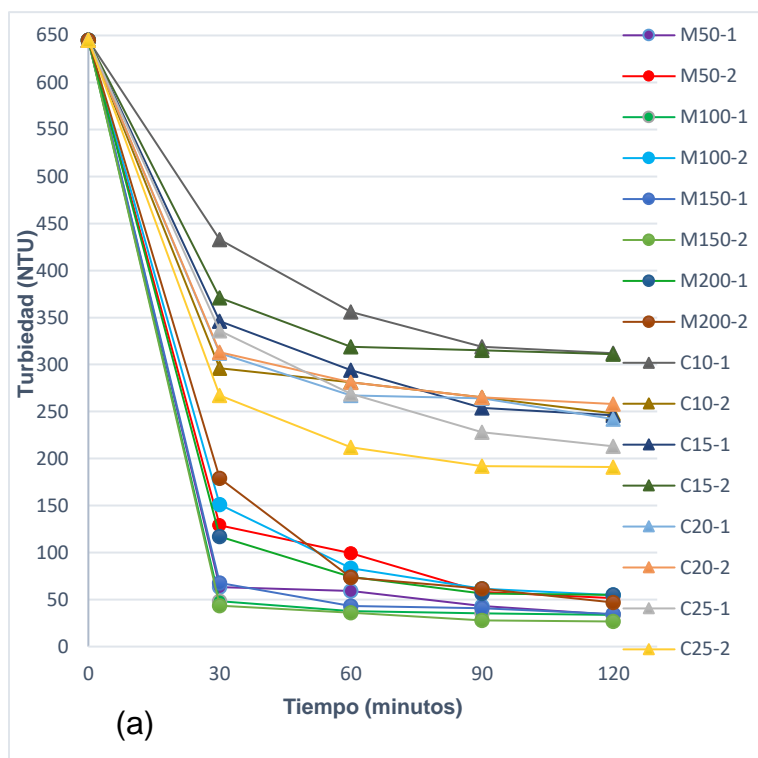


Figura 12. Variación de la turbiedad y color en el tiempo de sedimentación de los coagulantes empleados. (a) Turbiedad en la primera prueba de laboratorio. (b) Turbiedad en la segunda prueba. (c) Color en la primera prueba. (d) Color en la segunda prueba.

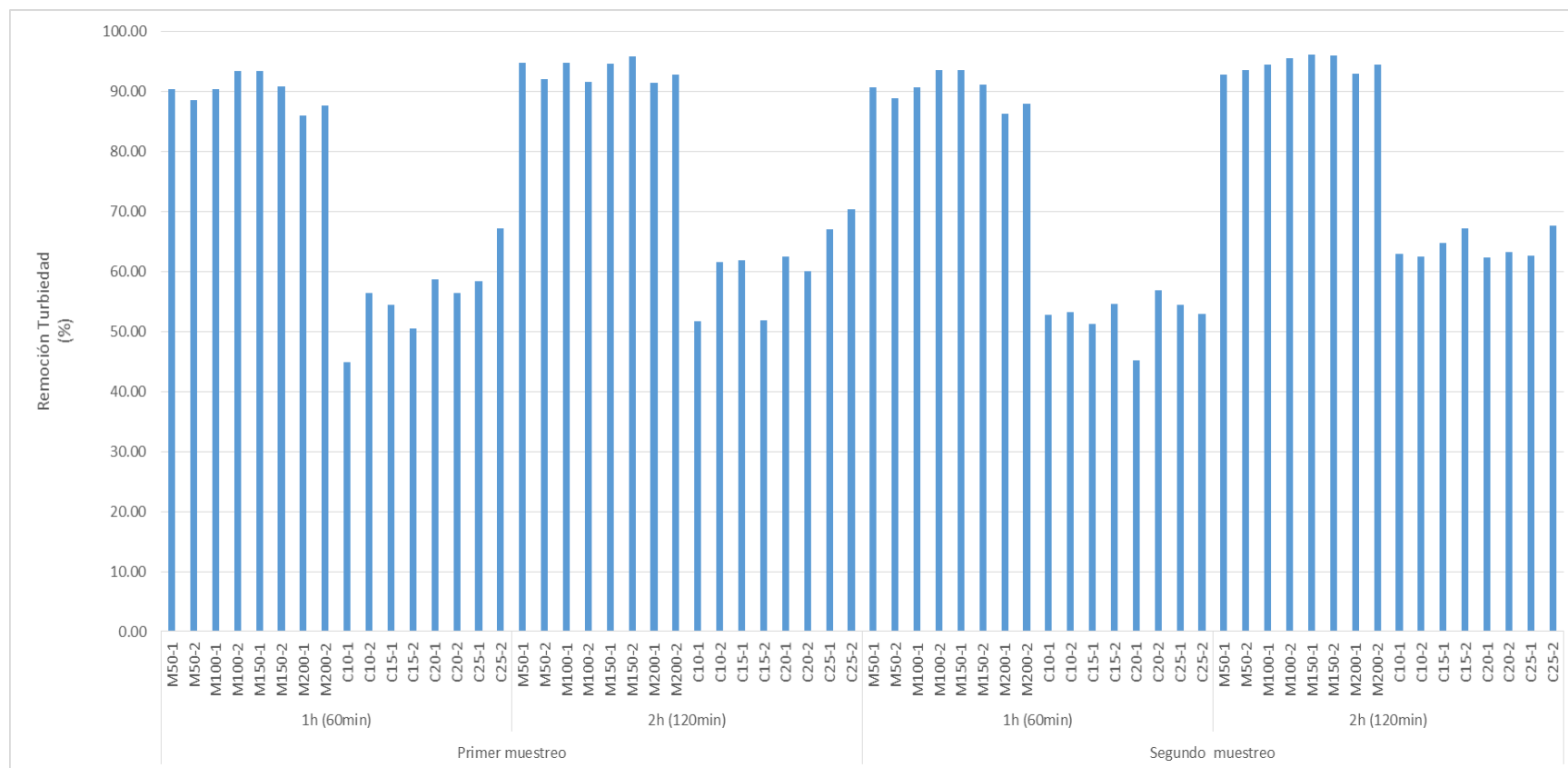


Figura 13. Remoción de turbiedad (%) Vs condiciones de los coagulantes empleados

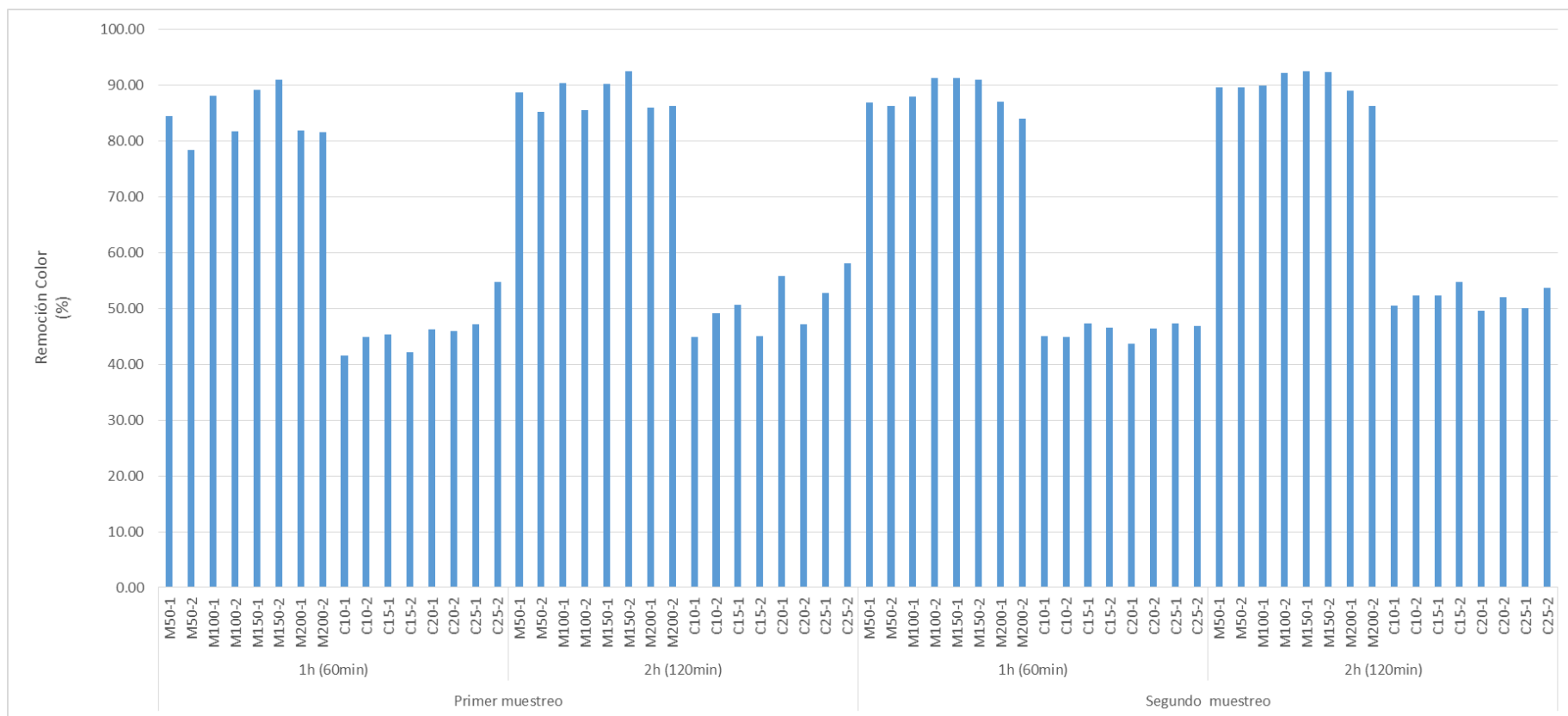


Figura 14. Remoción de color (%) Vs condiciones de los coagulantes empleados

En estas graficas puede observarse que el coagulante que obtuvo mejor remoción de turbiedad y color en las dos pruebas realizadas en el laboratorio fue la Moringa, presentando remociones entre 91-96% de turbiedad y 85 a 93% de color, mientras que la Cañandonga entre 52-70% de turbiedad y 45% a 58% de color. Este resultado ratifica lo presentado en la literatura que indica que la Moringa es uno de los coagulantes naturales más empleados en el mundo, presentando remociones similares a la de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio o policloruro de aluminio (Lédo *et al.*, 2009; Betatache *et al.*, 2014).

Por otro lado, se determinó que la dosis óptima de la Moringa fue de 150 mg/L en los dos muestreos. Cabe aclarar que se presentó una diferencia de tiempo en la mezcla: En la primera prueba fue de 2 minutos, con una remoción de turbiedad y color del 96% y del 92%, respectivamente; mientras que en la segunda fue de 1 minuto con remociones de turbiedad y color del 96% y del 93%. Este resultado permite inferir que hubo un efecto de la agitación manual rápida (mezcla rápida) sobre el proceso de coagulación, generado porque la agitación manual no es constante como la de los test de jarras o agitadores mecánicos. No obstante, se define en esta investigación que la concentración de 150 mg/L de Moringa pudo haber sido el punto isoeléctrico, el cual se da cuando la dosis del coagulante compensa exactamente las cargas de las partículas del agua, y un aumento de concentración como la de 200 mg/L pudo haber afectado este equilibrio de cargas, produciendo un incremento en la turbiedad y color, como se presentó en este trabajo.

En cuanto a la Cañandonga, se encontró que la dosis óptima fue de 25 mg/L en un tiempo de mezcla rápida de 2 minutos en ambos muestreos; siendo las remociones del primer muestro de turbiedad y color de 70% y 58%, respectivamente; y del segundo de 67% y de 53%). Aunque en el estudio realizado por Guzmán *et al.* (2015) se encontraron remociones mayores de turbiedad (95%) y color (88%), en este trabajo el rendimiento no fue igual probablemente porque la fuente de agua que evaluaron estos autores es menos turbia (120 UNT) que la fuente de captación de agua de los pueblos palafíticos, mientras que la del caño de Aguas Negras

superó los 600 UNT. Es por ello que logra inferirse que el punto isoeléctrico para la cañadonga en esta investigación pudo no haberse dado, ya que concentraciones mayores a las aplicadas de este coagulante quizá logren incrementar su eficiencia en la remoción de turbiedad y color, pero no se tuvieron en cuenta en este estudio.

8.3 Etapa 3: Determinación de alternativas a bajo costo de procesos de filtración y/o desinfección

8.3.1 Eficiencia de los filtros empleados (bioarena y carbón activado)

Los resultados de las dos pruebas realizadas en laboratorio se muestran en la Tabla 5. En esta se indica la fecha del muestreo, los valores de los parámetros medidos de la muestra inicial (agua cruda sin la aplicación de coagulantes), así como los de las combinaciones de los coagulantes con los filtros empleados y el del criterio de la normativa colombiana de agua potable (Resolución 2115/2007).

Tabla 5. Datos medidos de los parámetros de calidad de agua después de la filtración vs la muestra inicial (agua cruda)

Coagulante		Muestra Inicial	Moringa óptimo		Cañandonga óptimo		Sin coagulantes		Norma colombiana 2115/2007
Tipo de filtro			Filtro de bioarena	Filtro de carbón activado	Filtro de bioarena	Filtro de carbón activado	Filtro de bioarena	Filtro de carbón activado	
Primer muestreo (4/05/2017)	pH	7.12	7.04	6.85	6.65	7.02	6.93	7.1	6.5-9
	Temperatura (°C)	29.8	29.5	29.4	29.7	29.6	29.6	29.5	N/A
	Conductividad (µS/cm)	345	341	339	290	312	291	314	1000
	Color (UPC)	375	12.95	11.65	13.81	13.3	16.3	14.2	15
	Turbiedad (NTU)	645	7.7	6.9	9.1	8.8	11.2	10.2	2
	Alcalinidad (mg/L CaCO3)	65.4	57.62	54.41	52.98	61.47	63.92	59.64	200
	Dureza total (mg/L CaCO3)	357.8	315	307.6	324.4	318	322.4	324.6	300
	Cloruros (mg/L Cl-)	61.68	42.54	49.63	35.45	42.54	28.38	35.45	250
	Sulfatos (mg/L)	58	35	26	57	52	46	41	250
	Nitratos (mg/L)	2.1	1.9	1.5	2.1	1.8	2.1	1.9	10
Coliformes totales (UFC/100 ml)	12100	3100	2800	3500	3800	5200	4300	0	
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	1700	300	215	155	90	128	210	0	
Segundo muestreo (16/05/2017)	pH	7.43	7.39	7.49	7.3	7.31	7.41	7.4	6.5-9
	Temperatura (°C)	28.1	28	27.9	27.8	27.7	27.6	27.4	N/A
	Conductividad (µS/cm)	205	199.94	203	201	200.1	203.1	204	1000
	Color (UPC)	388.7	13.15	11.73	14.42	13.04	16.76	13.88	15
	Turbiedad (NTU)	662	8.1	7.5	10.2	7.9	11.7	10.6	2
	Alcalinidad (mg/L CaCO3)	52.8	46.8	48.3	50.8	52.8	52.8	52.7	200
	Dureza total (mg/L CaCO3)	330.8	293.8	289.3	302.1	286.2	295.4	303.4	300
	Cloruros (mg/L Cl-)	42.54	35.27	31.9	32.36	29.45	42.54	39.43	250
	Sulfatos (mg/L)	57	57	48	56	41	57	53	250
	Nitratos (mg/L)	1.3	1.1	0.9	1.2	1.1	1.3	1.2	10
	Coliformes totales (UFC/100 ml)	13700	3800	3400	4200	4600	6300	5200	0
	Coliformes fecales (UFC/100 ml)	1000	126	94	156	225	210	188	0

Concretamente, en la tabla anterior se reportan los valores de los parámetros de calidad de agua medidos después del proceso de filtración; en el caso de los dos coagulantes evaluados (Moringa y Cañandonga) tuvieron un proceso de coagulación previo al de filtración para ver el efecto de la combinación coagulante-tipo de filtro (de bioarena o de carbón activado), comparándolos con una muestra control, que fue el agua filtrada en estos dos filtros sin usar coagulante previamente.

Con base a los datos presentados en la Tabla 5, se observa que aunque hubo remoción de los parámetros de calidad de agua analizados, los siguientes parámetros no cumplieron con el criterio de agua potable definido en la Resolución 2115/2007: turbiedad, color en uno de los tratamientos aplicados, dureza total, coliformes totales y fecales.

Adicionalmente, se realizó un análisis descriptivo de los datos medidos después de la filtración, sin incluir la muestra de agua cruda, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Análisis descriptivo de los parámetros de calidad de agua medidos después de la filtración

Parámetro	N	Promedio	Mínimo	Máximo	Des. Est.	C.Variación (%)
pH	12	7.16	6.65	7.49	0.26	3.70
Temperatura (°C)	12	28.64	27.40	29.70	0.96	3.36
Conductividad (µS/cm)	12	258.18	199.94	341.00	60.71	23.51
Color (UPC)	12	13.77	11.65	16.76	1.55	11.26
Turbiedad (NTU)	12	9.16	6.90	11.70	1.59	17.32
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	12	54.05	46.80	63.92	16.37	30.28
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	12	306.85	286.20	324.60	13.90	4.53
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	12	37.08	28.38	49.63	6.35	17.14
Sulfatos (mg/L)	12	47.42	26.00	57.00	10.00	21.08
Nitratos (mg/L)	12	1.51	0.90	2.10	0.43	28.48
Coliformes totales (UFC/100 ml)	12	4183.00	2800.00	6300.00	1008.00	24.10
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	12	175.00	90.00	300.00	61.00	34.86

[N]: Número de datos

En la anterior tabla se observa que los datos que menos presentaron coeficiente de variación fueron el pH y la temperatura con un valor de 3.7% y 3.36%, respectivamente, lo que indica que los datos fueron los más homogéneos; mientras que los coliformes fecales y la alcalinidad fueron los más heterogéneos con un valor del coeficiente de variación del 34.86% y 30.28%, respectivamente. La variación alta indica que la distribución de los datos del respectivo parámetro medido fue más dispersa en comparación con la de los demás, aunque son parámetros con unidades diferentes.

Por otra parte, se realizó un análisis de los resultados por parámetro de calidad de agua, teniendo en cuenta el criterio de que haya sobrepasado el límite permisible de calidad de agua potable después de la filtración, además se incluyó el pH para ver el efecto de los coagulantes sobre el pH del agua tratada con las alternativas de filtración propuestas. El objeto de este análisis fue evaluar el rendimiento de los filtros empleados así como su combinación con los dos coagulantes naturales utilizados, teniendo en cuenta la reducción de los parámetros evaluados comparándolos con el respectivo límite máximo permisible definido en la Resolución 2115/2007.

- pH

El pH no varió significativamente, osciló entre 6.65 y 7.49, estando dentro del rango recomendado para consumo de agua potable de acuerdo a la normatividad colombiana (6 a 9), indicando que los dos coagulantes empleados no afectaron el pH. Este aspecto es importante ya que facilita la operación de los procesos posteriores a la coagulación al no tener que controlar el pH del agua porque este afecta los posteriores procesos de tratamiento de agua (Rojas, 2015).

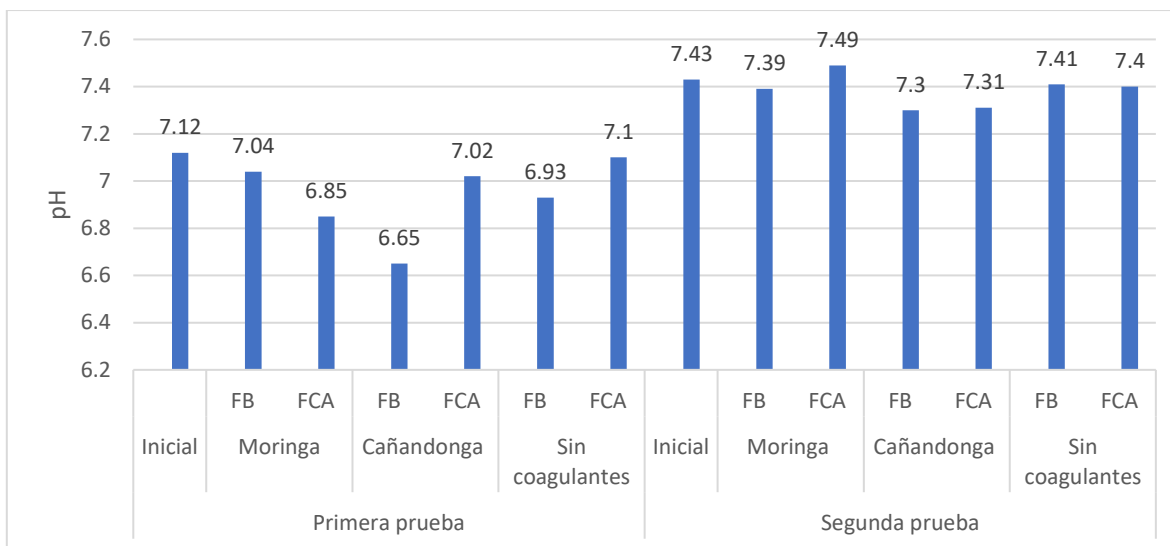


Figura 15. Variación del pH después de la filtración

[FB]: Filtro de bioarena, [FCA]: Filtro de carbón activado

- Turbiedad

En la Figura 16 se muestran los valores de la turbiedad después del proceso de filtración; como se mencionó anteriormente, en el caso de los dos coagulantes evaluados (Moringa y Cañandonga) tuvieron un proceso de coagulación previo al de filtración, mientras que en el del agua cruda (sin el proceso de coagulación o sin coagulantes) obviamente no se evaluó dicho proceso, dado que sirvió como prueba control del proceso combinado de coagulación-filtración.

Teniendo en cuenta todas las pruebas, los valores de la turbiedad luego de la filtración oscilaron entre 6.9 y 11.7 UNT, rango que sobrepasa los niveles permisibles de la norma de calidad de agua, como puede verse en la Figura 16. Sin embargo, estos datos están dentro del rango recomendable (<30 UNT) para aplicar técnicas de radiación solar y radiación UV mediante lámparas.

Por otra parte, el cálculo de las remociones de turbiedad en todos los escenarios evaluados (Ver Figura 17) se estimó teniendo en cuenta los valores iniciales, que variaron en cada caso: en la combinación de coagulante-filtro se tuvo en cuenta el

valor de la turbiedad después del proceso de sedimentación con el coagulante óptimo, siendo el de la Moringa en la primera prueba de 26.7 UNT y en la segunda de 25.93 UNT, el de la Cañandonga de 191 UNT en la primera prueba y 214 UNT en la segunda; y en la muestra de agua filtrada sin coagulante se tuvo en cuenta la muestra de agua inicial de los dos ensayos realizados (antes del tratamiento de agua propuesto), que correspondieron a 645 UNT en la primera prueba y a 662 UNT en la segunda prueba. Estos valores fueron comparados respectivamente con los datos obtenidos después de la filtración (valores mostrados en la Figura 16).

En la Tabla 7 se muestran los valores iniciales y finales de la turbiedad para el cálculo de las remociones obtenidas en la combinación coagulante-tipo de filtro:

Tabla 7. Valores de referencia para la eficiencia de la combinación coagulante-tipo de filtro

Prueba	Coagulante	Tipo de filtro	Valor inicial Turbiedad (UNT)	Valor final Turbiedad (UNT)
Primera prueba	Moringa óptimo	Filtro de bioarena (FB)	26.7	7.7
		Filtro de carbón activado (FCA)	26.7	6.9
	Cañandonga óptimo	Filtro de bioarena (FB)	191	9.1
		Filtro de carbón activado (FCA)	191	8.8
	Sin coagulantes	Filtro de bioarena (FB)	645	11.2
		Filtro de carbón activado (FCA)	645	10.2
Segunda prueba	Moringa óptimo	Filtro de bioarena (FB)	25.93	8.1
		Filtro de carbón activado (FCA)	25.93	7.5
	Cañandonga óptimo	Filtro de bioarena (FB)	214	10.2
		Filtro de carbón activado (FCA)	214	7.9
	Sin coagulantes	Filtro de bioarena (FB)	662	11.7
		Filtro de carbón activado (FCA)	662	10.6

Con base a los datos mostrados en la tabla anterior, se calcularon las remociones respectivas de la combinación coagulante-tipo de filtro (Valores mostrados en la Figura 17) mediante la siguiente ecuación:

$$Remoción(\%) = \frac{Valor\ inicial - Valor\ final}{Valor\ inicial} * 100 \quad (Ecuación\ 1)$$

A continuación se realiza un ejemplo de cálculo para el caso de combinación de Moringa óptimo y el filtro de bioarena de la primera prueba:

$$\text{Remoción}(\%) = \frac{26.7 - 7.7}{26.7} * 100 = 71.16 \approx 71.2\%$$

Realizando todos los cálculos de las remociones de turbiedad, se encontró que variaron entre 68.8% y 98.4% como puede observarse en la Figura 17, las remociones más bajas se dieron en la combinación de los dos filtros evaluados (carbón activado y de bioarena) con la Moringa como coagulante, debido a que se obtuvo la mayor remoción de partículas del agua en el proceso de coagulación con este coagulante, de 91-96%, presentándose los valores más bajos de la turbiedad antes del proceso de filtración, y el rango de variabilidad de todos los valores de turbiedad obtenidos después de la filtración fue bajo, como puede observarse en la Figura 16. Mientras que las remociones más altas se obtuvieron en el caso de la filtración de agua cruda (sin aplicar coagulantes), estando entre el 98.2 y 98.4%, aunque estas remociones fueron altas, el agua filtrada en ningún caso alcanzó a cumplir con el límite máximo permisible de turbiedad según la legislación colombiana vigente.

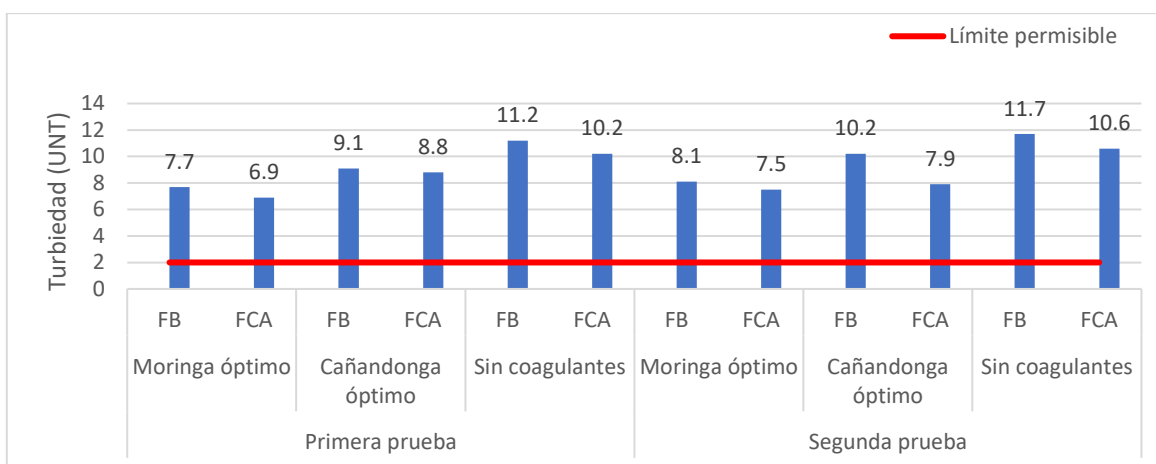


Figura 16. Variación de la turbiedad después de la filtración

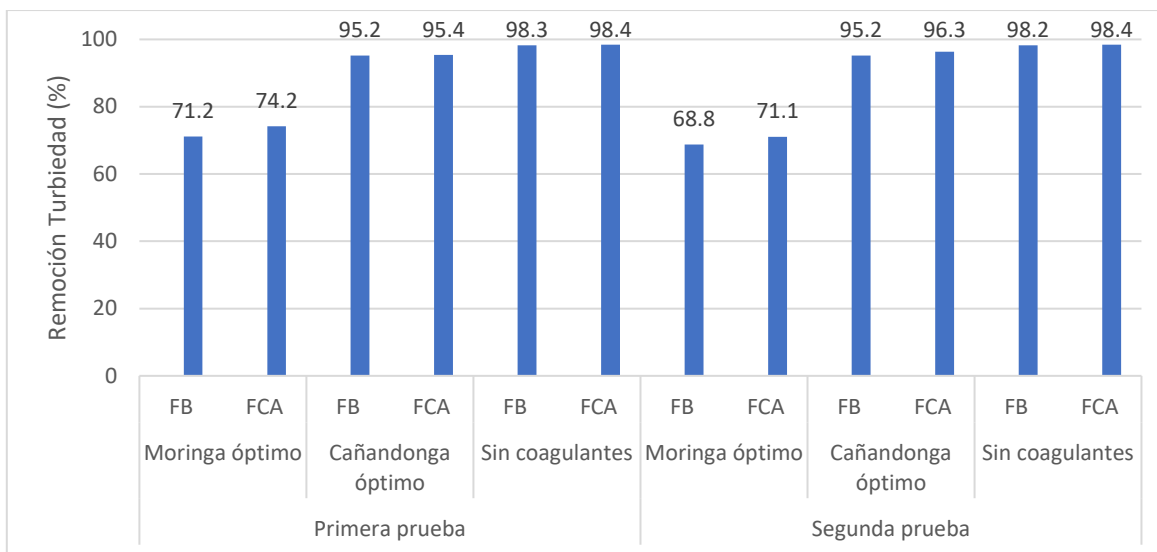


Figura 17. Remoción de la turbiedad después de la filtración- [FB]: Filtro de bioarena, [FCA]: Filtro de carbón activado

- Color

La eficiencia en la remoción de los dos filtros sin la combinación de los coagulantes y con el uso de coagulantes antes del proceso mantuvo el color del agua filtrada dentro de los niveles permitidos por la normatividad colombiana (15 UPC). Sin embargo, el límite recomendable no se cumplió en la filtración del agua sin coagulantes empleando el filtro de bioarena, con un valor de 16.3 UPC en la primera prueba y 16.76 UPC en la segunda prueba, representando una excedencia del límite permisible de 1.3 UPC y 1.76 UPC, respectivamente. Al igual que en el parámetro de turbidez, las remociones más altas de color se obtuvieron en el agua cruda (sin coagulantes) en los dos filtros estudiados (90.7-96.2%) y las más bajas con el agua filtrada previamente aplicando la Moringa como coagulante. Esto puede ser debido a que la turbiedad y color son parámetros que están relacionados ya que dependen principalmente de las partículas contenidas en el agua (Gúzman *et al.*, 2015).

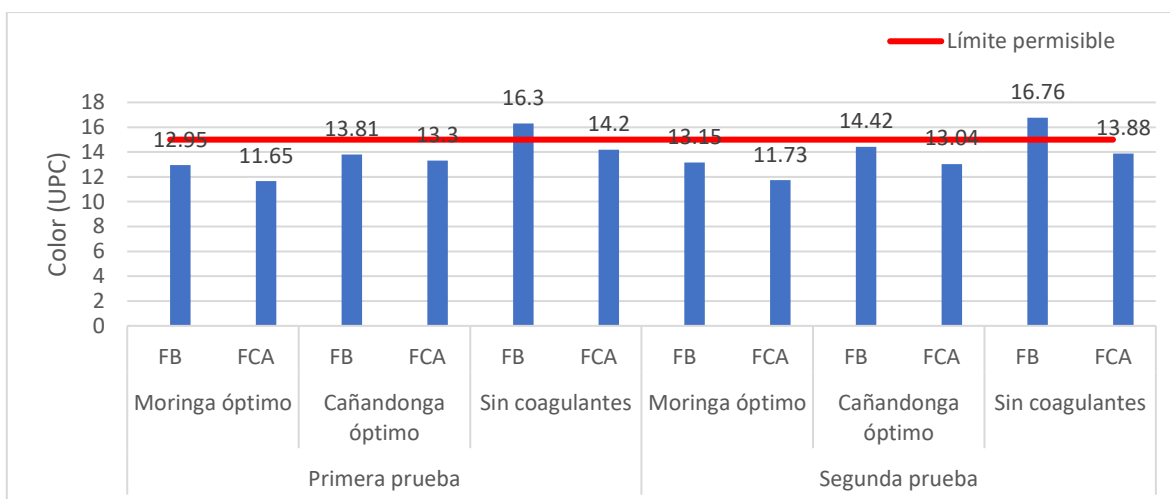


Figura 18. Variación del color después de la filtración

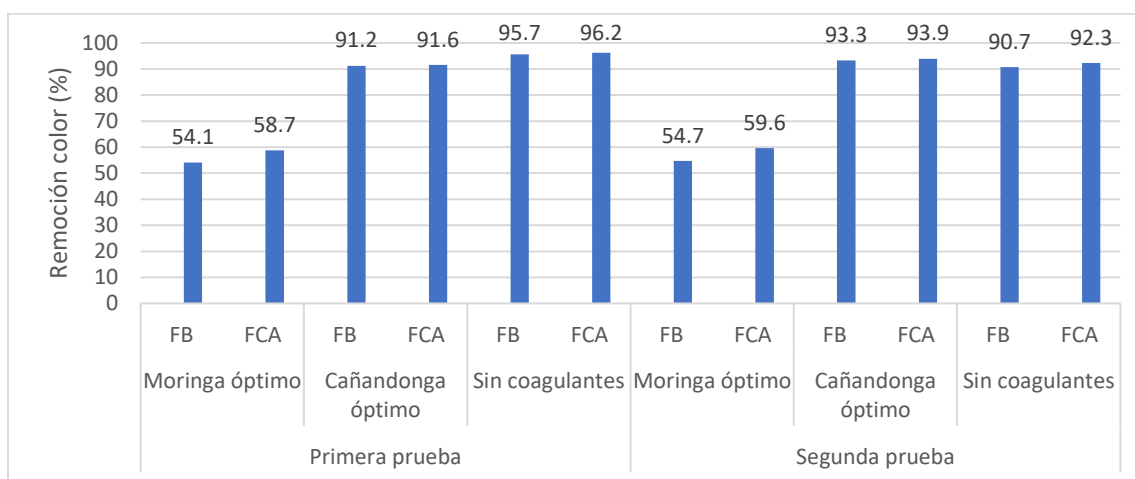


Figura 19. Remoción del color después de la filtración

- Dureza total

En la mayoría de las pruebas de filtración en el segundo muestreo, la dureza total estuvo por debajo del límite permisible en cuanto a este parámetro, sólo en dos casos sobrepasaron el nivel permisible en este segundo periodo de análisis con porcentajes de excedencia de este nivel permisible de 0.7% y 1.13%, que corresponden a 2.1 mg/L CaCO_3 y 3.4 mg/L CaCO_3 (Ver Figura 20). Sin embargo, las remociones de la dureza total fueron bajas, con una mayor remoción del 14% (Ver Figura 21). De todos los casos el máximo valor en la salida de los filtros fue de 324.6 mg/L CaCO_3 , aunque sobrepasa la norma colombiana, está dentro del rango

tolerable por algunos consumidores ($<500 \text{ mg/L CaCO}_3$) según el manual de la OMS de calidad de agua potable; y si se tiene en cuenta este criterio, los niveles excedidos de este parámetro no representarían un riesgo en la salud de los habitantes de los pueblos estudiados. Por otra parte, es de esperarse remociones bajas en cuanto a este parámetro, debido que para su remoción del agua se requieren otros procesos o técnicas, como por ejemplo: intercambio catiónico (resina catiónica) y ablandamiento por precipitación (adición de cal, cal y carbonato sódico o hidróxido sódico) (Rojas, 2015; Arboleda, 2000).

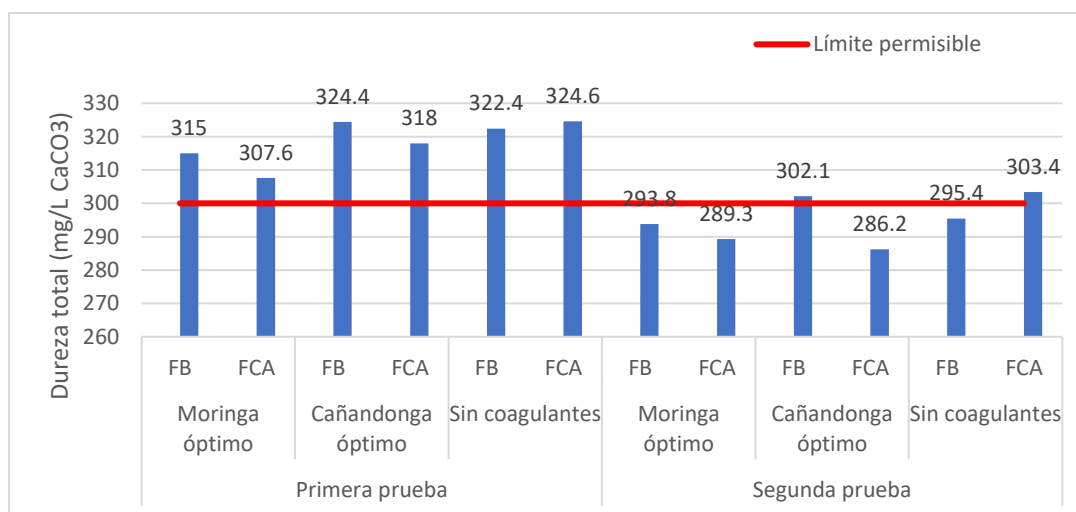


Figura 20. Variación de la dureza total después de la filtración

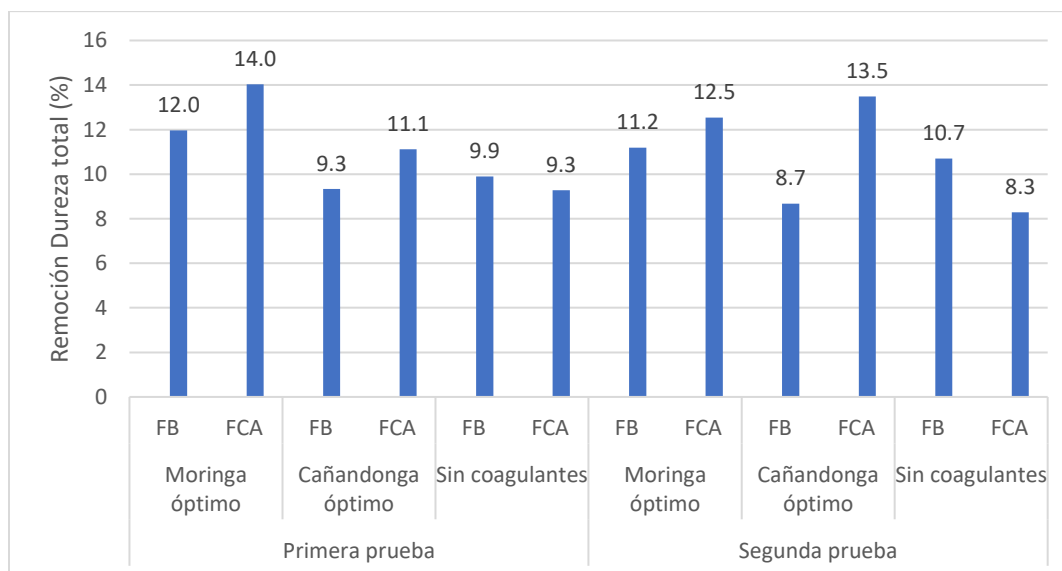


Figura 21. Remoción de la dureza total después de la filtración

- Coliformes totales

Los valores más bajos de coliformes totales después de la filtración se presentaron en la combinación de la Moringa con los dos filtros utilizados, oscilando entre 2800 a 3800 UFC/100ml y los más altos con la filtración sin el uso de coagulantes naturales, entre 4300 a 6300 UFC/100ml (Ver Figura 22). Las eficiencias en la eliminación oscilaron entre 54 y 76.9% (Ver Figura 23), siendo la más eficiente la filtración posterior al proceso de coagulación usando Moringa. Esto puede ser explicado porque en el proceso de coagulación se elimina alrededor del 30% de bacterias patógenas en el agua adicional a la eficiencia del proceso de filtración que se estima de aproximadamente 50%; y por tanto, se esperaría mayor reducción de patógenos en la combinación de los filtros con el coagulante más efectivo, en este caso la Moringa (OMS, 2006). A pesar de la remoción de microorganismos mediante estos dos filtros, las concentraciones microbianas siguen siendo altas, representado riesgo para la salud humana, por lo que fue pertinente aplicar desinfección al agua con estas características microbiológicas.

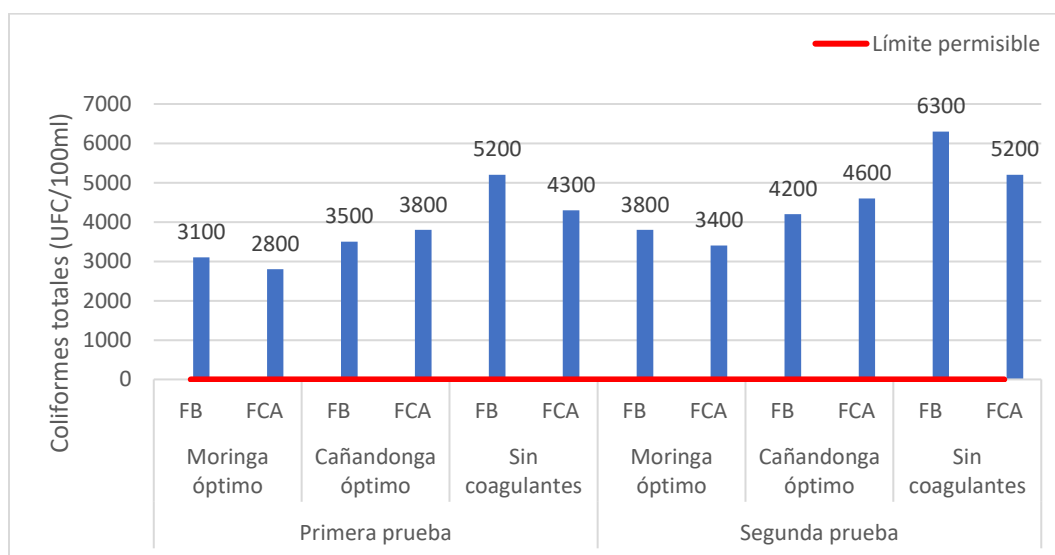


Figura 22. Variación de los coliformes totales después de la filtración

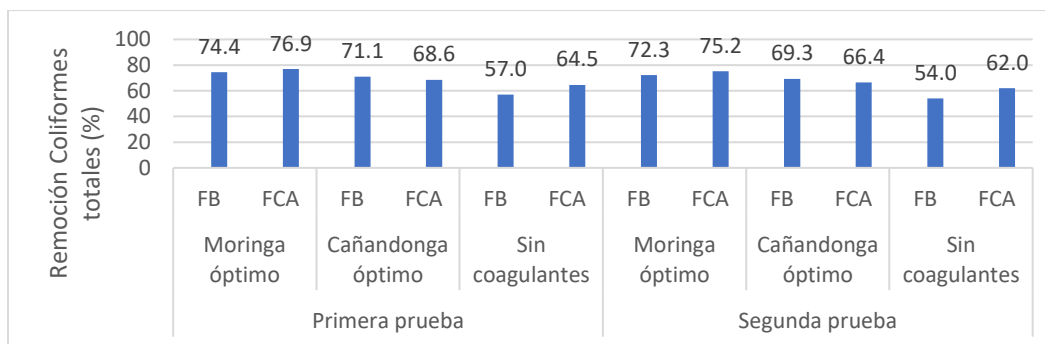


Figura 23. Remoción de Coliformes totales después de la filtración

- Coliformes fecales

Los valores de coliformes fecales luego de la filtración no cumplieron con el criterio recomendado por la normatividad colombiana en cuanto a este indicador microbiológico, siendo el valor más bajo de 90 UFC/100ml y el más alto de 300 UFC/100ml (Ver Figura 24); aunque las eficiencias en la eliminación de coliformes fecales fueron altas (77.5% a 94.7%) (Ver Figura 25). A diferencia de los coliformes totales, la eficiencia en la eliminación de los coliformes fecales no tuvo una tendencia clara, debido a que la combinación de los filtros con los coagulantes no incrementó el rendimiento de la remoción de este parámetro microbiológico; como por ejemplo, en el primer muestreo se encontró altas remociones de coliformes fecales en el agua filtrada sin el uso de coagulante (87.6% y 92.5%), mientras que en el segundo varió entre 79% y 81.2%, lo cual resulta difícil explicar, pero debe tenerse en cuenta para el análisis que los coliformes totales incluyen a los coliformes fecales.

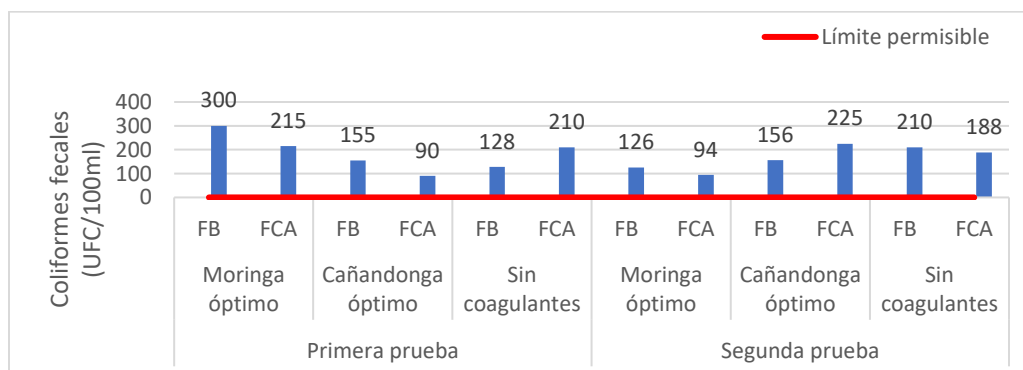


Figura 24. Variación de los coliformes fecales después de la filtración

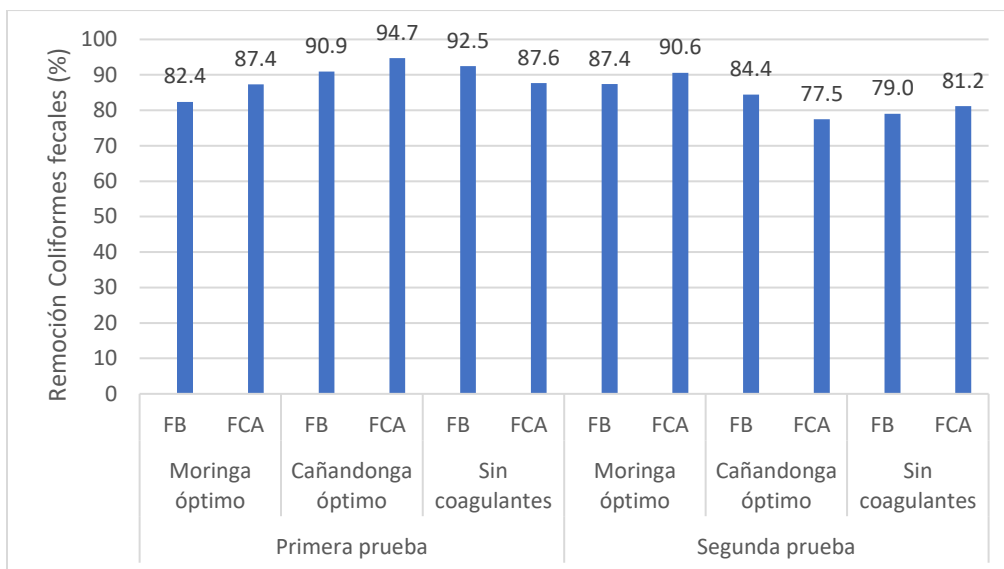


Figura 25. Remoción de Coliformes fecales después de la filtración

Por otro lado, se aplicó el test ANOVA simple con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$) usando Statgraphics centurion XV; y en el caso que no cumplieran con los supuestos del modelo (normalidad, homocedasticidad e independencia), el test no paramétrico de Kruskal-Wallis, con la finalidad de comparar el rendimiento del promedio o mediana (según aplique) entre los dos filtros empleados (filtro de bioarena y de carbón activado), así como las combinaciones entre coagulantes y estos dos filtros para establecer cuál filtro o combinación entre coagulante es más eficiente. Para ello se tomó como variable respuesta los parámetros considerados importantes (turbiedad, color, dureza total, coliformes totales y coliformes fecales) medidos en el agua filtrada y como factores: (1) filtro de bioarena y carbon activado para la comparación entre filtros; y (2) las combinaciones entre coagulantes (Moringa y Cañandonga) y los dos filtros estudiados. Los valores que se compararon fueron los datos obtenidos de cada parámetros después de la filtración ya que estos muestran el grado de cumplimiento de los parámetros de calidad de agua tenidos en cuenta con la normatividad colombiana vigente. En la siguiente tabla se resume el análisis estadístico de comparación de medias:

Tabla 8. Resultados de la comparación entre filtros y combinaciones entre filtros y coagulantes del promedio o mediana de los parámetros evaluados considerados más importantes.

Comparación	Parámetros	Test	P-valor
Filtros (Carbón activado y de bioarena)	Turbiedad	ANOVA	0.288
	Color	ANOVA	0.071
	Dureza total	ANOVA	0.641
	Coliformes totales	ANOVA	0.18
	Coliformes fecales	ANOVA	0.664
Combinación filtro-coagulante natural	Turbiedad	Kruskal-Wallis	0.103
	Color	Kruskal-Wallis	0.104
	Dureza total	Kruskal-Wallis	0.761
	Coliformes totales	Kruskal-Wallis	0.227
	Coliformes fecales	ANOVA	0.887

Los resultados de la tabla anterior muestran que en todos los parametros evaluados no hubo diferencia estadística con una significancia de 0.05 entre los valores promedios obtenidos con los dos filtros estudiados y con la integración del proceso de coagulación (coagulantes naturales) y dichos filtros. Por tanto, se pudo concluir que los filtros presentaron rendimientos similares con un nivel de confianza del 95% en cuanto al valor obtenido de los parametros después del proceso de filtración. Esto puede ser explicado porque los dos filtros contenían arena como lecho filtrante, la cual ha demostrado tener alta eficiencia en la remoción de turbiedad, color, coliformes totales y fecales, y baja eficiencia en la remoción de la dureza total del agua; pero la diferencia de los filtros fue que el de carbón activado contenía una capa de carbón activado adicional a la arena, la cual es capaz de remover contaminantes químicos, que no se sabe si se estuvieron contenidos en el agua, ya que no se evaluaron en el agua cruda y después del tratamiento de filtración mediante la adición de este lecho filtrante (carbon activado granular), quizá asumiendo que no hubo presencia de altas concentraciones de contaminantes químicos puede ser la razon que produjo el comportamiento parecido en la remocion de los contaminantes evaluados en el tratamiento de agua del caño Aguas Negras.

8.3.2 Eficiencia de los dos procesos de desinfección usados (Lámpara UV y SODIS)

En la siguiente tabla se muestran los valores de los dos indicadores microbiológicos analizados (coliformes totales y fecales). El dato de entrada corresponde a los procesos llevados a cabo antes de la desinfección y el de la salida al valor obtenido después de la desinfección.

Tabla 9. Coliformes totales y fecales después de la filtración vs la muestra de agua filtrada

Primer muestreo (4/05/2017)								
Coagulante	Tipo de filtro	Técnica de desinfección	Coliformes totales (UFC/100 ml)			Coliformes fecales (UFC/100 ml)		
			Entrada	Salida	Remoción (%)	Entrada	Salida	Remoción (%)
Moringa óptimo	Filtro de bioarena	SODIS	3100	57	98.16	300	17	94.33
		Radiación UV	3100	43	98.61	300	7	97.67
	Filtro de carbón activado	SODIS	2800	51	98.18	215	9	95.81
		Radiación UV	2800	33	98.82	215	4	98.14
Cañandonga óptimo	Filtro de bioarena	SODIS	3500	71	97.97	155	11	92.90
		Radiación UV	3500	45	98.71	155	6	96.13
	Filtro de carbón activado	SODIS	3800	55	98.55	90	5	94.44
		Radiación UV	3800	51	98.66	90	3	96.67
Sin coagulantes	Filtro de bioarena	SODIS	5200	87	98.33	128	8	93.75
		Radiación UV	5200	73	98.60	128	5	96.09
	Filtro de carbón activado	SODIS	4300	78	98.19	210	13	93.81
		Radiación UV	4300	65	98.49	210	8	96.19
Segundo muestreo (16/05/2017)								
Coagulante	Tipo de filtro	Técnica de desinfección	Coliformes totales (UFC/100 ml)			Coliformes fecales (UFC/100 ml)		
			Entrada	Salida	Reducción (%)	Entrada	Salida	Reducción (%)
Moringa óptimo	Filtro de bioarena	SODIS	3800	73	98.08	126	8	93.65
		Radiación UV	3800	56	98.53	126	5	96.03
	Filtro de carbón activado	SODIS	3400	58	98.29	94	3	96.81
		Radiación UV	3400	41	98.79	94	7	92.55
Cañandonga óptimo	Filtro de bioarena	SODIS	4200	92	97.81	156	13	91.67
		Radiación UV	4200	79	98.12	156	12	92.31
	Filtro de carbón activado	SODIS	4600	82	98.22	225	16	92.89
		Radiación UV	4600	71	98.46	225	8	96.44
Sin coagulantes	Filtro de bioarena	SODIS	6300	95	98.49	210	19	90.95
		Radiación UV	6300	84	98.67	210	11	94.76
	Filtro de carbón activado	SODIS	5200	86	98.35	188	15	92.02
		Radiación UV	5200	93	98.21	188	14	92.55

A continuación se analizarán por separado los datos de remoción de coliformes totales y fecales, para evaluar la eficiencia de las dos técnicas de desinfección empleadas (SODIS y radiación UV).

- **Coliformes totales**

En las siguientes figuras (26, 27, 28 y 29) se resume la información de la eficiencia en la remoción de SODIS y radiación UV. La codificación representada por las letras hacen referencia a la combinación entre coagulantes y filtros. [MFB]: Moringa-bioarena; [MFCA]: Moringa-carbón activado; [CFB]: Cañandonga-bioarena; [CFCA]: Cañandonga-carbón activado; [SFB]: Sin coagulante-bioarena; [SFCA]: Sin coagulante-carbón activado. Las concentraciones de los coliformes totales estuvieron por encima del nivel máximo permisible pero fueron menor a 100 UFC/100ml, representando alta remoción en la combinación de los procesos aplicados de coagulación, filtración y desinfección, en el cual se lograron remociones de coliformes totales del 97% al 98.8% del agua filtrada, lo cual es importante para reducir el riesgo de enfermedades por el consumo de agua con presencia de patógenos en los habitantes de los dos pueblos palafíticos estudiados. A diferencia de estudios realizado por Garrido *et al.* (2013), Muñoz *et al.* (2014), Timonthy *et al.* (2014) y D'Alessio *et al.* (2016) que encontraron remociones de aproximadamente 100%, en este estudio no se alcanzaron esas eficiencias quizá porque el agua filtrada no quedó totalmente clarificada, lo cual pudo incidir en la disminución de la eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos en el agua tratada con SODIS y radiación UV.

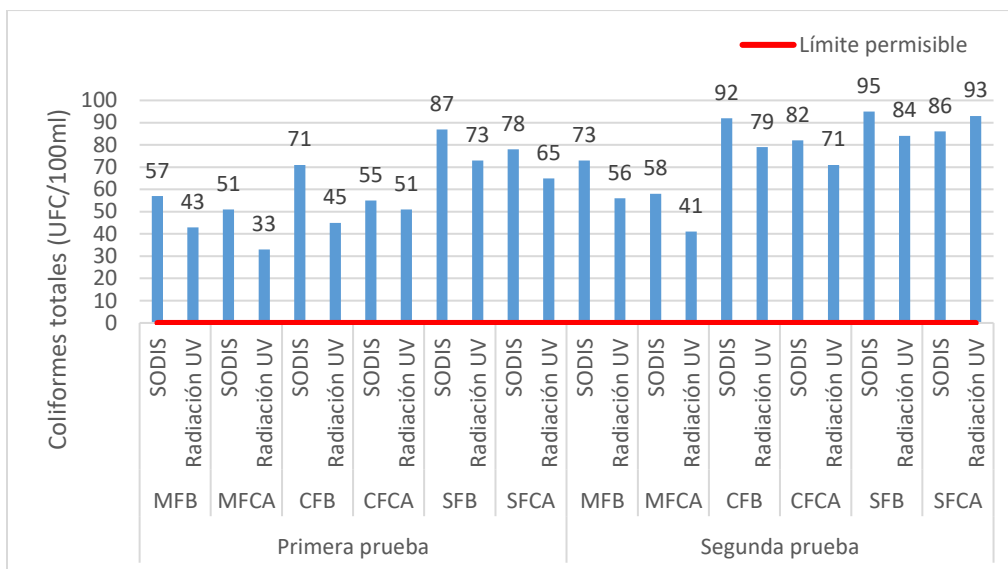


Figura 26. Variación de los coliformes totales después de la desinfección (salida de agua)

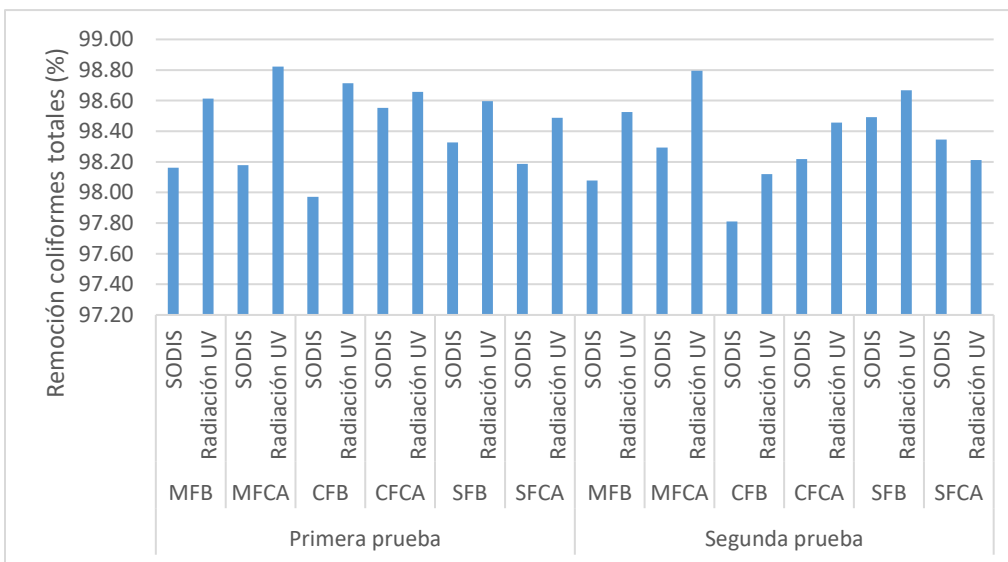


Figura 27. Remoción de Coliformes totales después de la desinfección

- Coliformes fecales

En el caso de los coliformes fecales se alcanzaron remociones de 91% al 98% aplicando SODIS y radiación UV, estando los valores por debajo de 20 UFC/100 ml, y al igual que la eliminación de los coliformes totales, no se alcanzó la remoción total debido a los efectos de la turbiedad sobre la radiación solar y la de radiación UV (lámpara UV).

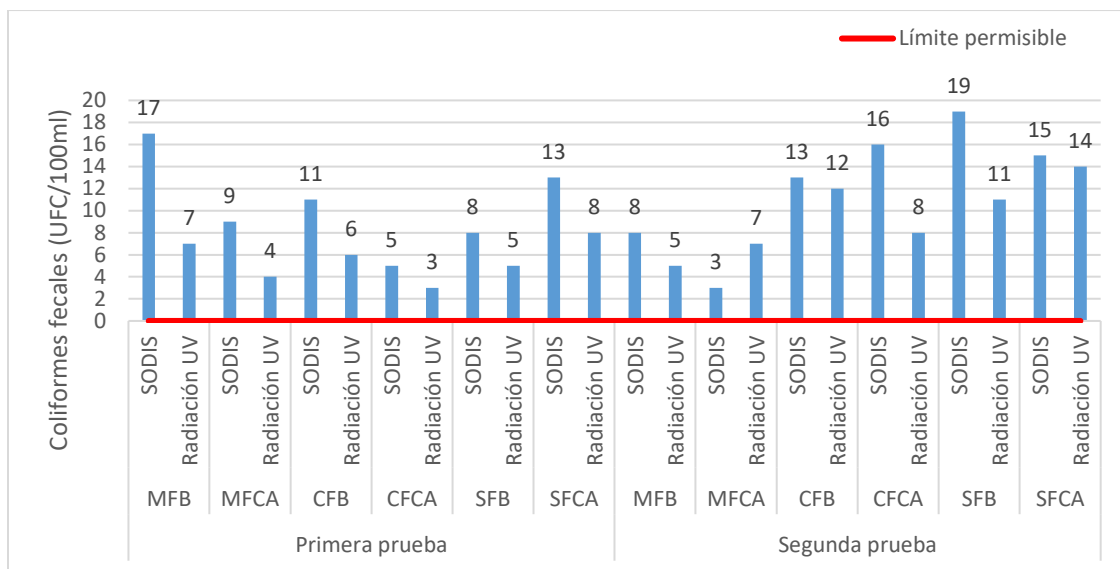


Figura 28. Variación de los coliformes fecales después de la desinfección (salida de agua)

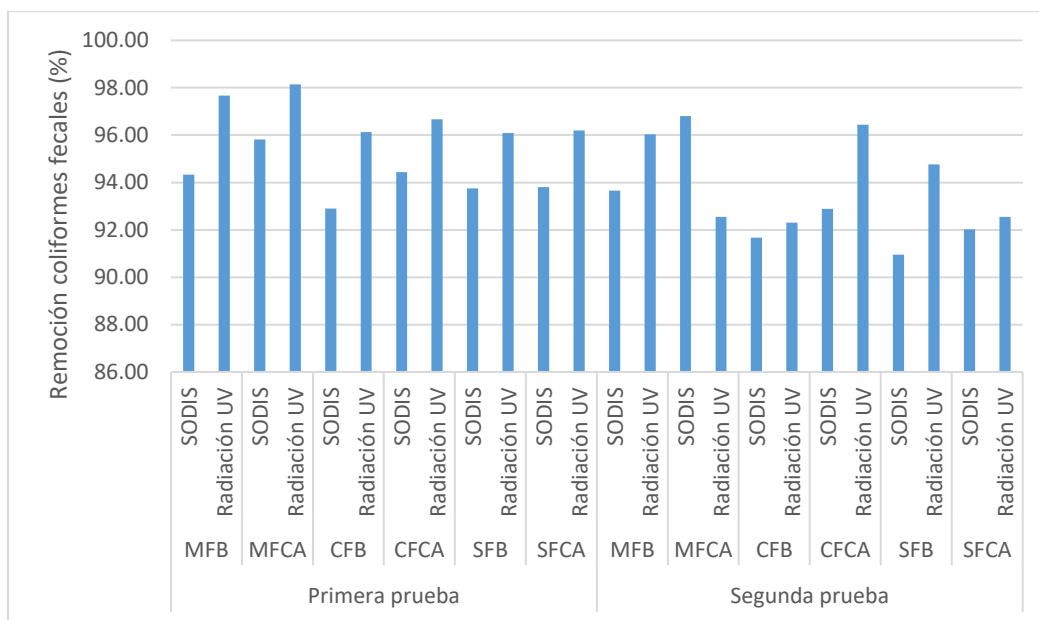


Figura 29. Remoción de Coliformes fecales después de la desinfección

En la siguiente tabla se resume el ANOVA aplicado con un nivel de confianza del 95% usando Statgraphics centurion XV para la comparación entre de los promedios de la concentración de coliformes totales y fecales medidos después del tratamiento con SODIS y radicación UV para determinar cuál de estas dos técnicas de

desinfección fue la que más disminuyó la concentración de estos dos parámetros microbiológicos.

Tabla 10. Resultados de la comparación de los dos indicadores evaluados (después de la desinfección) entre las dos técnicas de desinfección empleadas

Comparación	Parámetros	Test	P-valor
Desinfección (SODIS y radiación UV)	Coliformes totales	ANOVA	0.09
	Coliformes fecales	ANOVA	0.033

De acuerdo a los resultados mostrados en esta tabla, los valores promedio de coliformes totales medidos finalmente en el proceso de desinfección no variaron significativamente con una significancia de 0.05, lo cual indica que tanto el SODIS como la radiación UV tuvieron rendimientos similares para este parámetro. Sin embargo, en los coliformes fecales las concentraciones microbianas variaron significativamente con este mismo nivel de significancia, por lo que la lámpara UV tuvo mejor rendimiento para la eliminación de coliformes fecales, como puede observarse en la Figura 30. Sin embargo, este indicador microbiológico está incluido en el análisis de coliformes totales; por tanto, ambas técnicas bajo las condiciones aplicadas se pueden aplicar para el proceso de desinfección, el cual complementa los otros procesos anteriores propuestos (coagulación y filtración) para el tratamiento de agua potable del caño Aguas Negras.

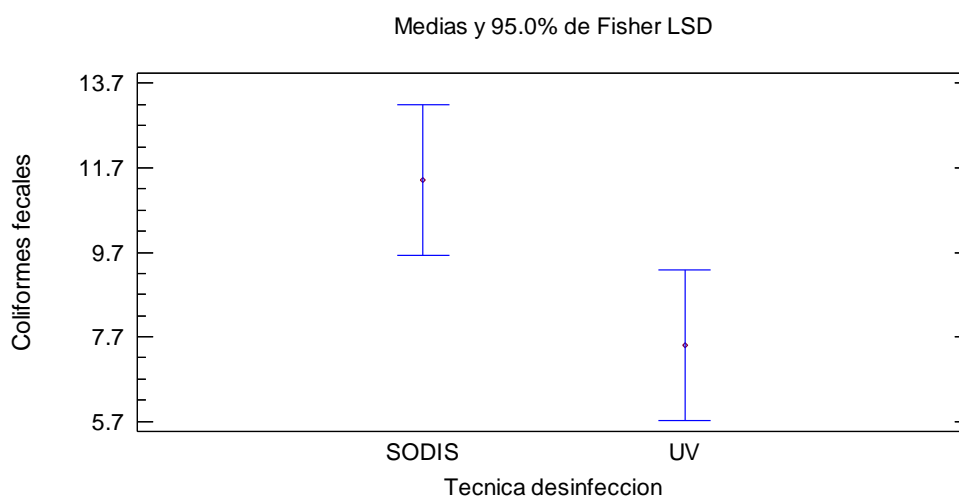


Figura 30. Gráfico de comparación de medias entre SODIS y radiación UV

Por otro lado, se estimó el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) definido en el Decreto 1575 de 2007 e implementada la metodología de cálculo en la Resolución 2115/2007, con el fin de inspeccionar si el tratamiento propuesto contribuye a la reducción del riesgo sanitario del agua de consumo de las comunidades palafíticas estudiadas. En la Ecuación 1 se presenta el cálculo del IRCA de acuerdo a la metodología propuesta en la Resolución 2115/2007:

$$IRCA(\%) = \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100 \text{ (Ecuación 2)}$$

El numerador de la Ecuación 2 hace referencia a la sumatoria de los puntajes de riesgo en el caso de incumplimiento de los parámetros de calidad de agua evaluados con respecto a los niveles aceptables definidos en la Resolución 2115/2007 (Ver Tabla 11), los valores de los parámetros que cumplan con el nivel máximo permisible tienen un puntaje de riesgo de cero (valor de 0). En el denominador se hace referencia a la sumatoria de todos los puntajes de riesgo de cada parámetro (ver Tabla 11). En esta tabla se presentan los puntajes de riesgo aplicables de acuerdo a los parámetros de calidad de agua medidos en este trabajo, los parámetros: temperatura, conductividad y coliformes fecales no son tenidos en cuenta en esta metodología, por lo que no son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 11. Puntajes de riesgo para el cálculo del IRCA definido en la Resolución 2115/2007

Parámetro	Puntaje de riesgo
pH	1.5
Color (UPC)	6
Turbiedad (NTU)	15
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	1
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	1
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	1
Sulfatos (mg/L)	1
Nitratos (mg/L)	1
Coliformes totales (UFC/100 ml)	15

Una vez realizados los cálculos del IRCA, se compararon con la clasificación del nivel de riesgo en salud que se muestra en la Resolución 2115/2007, siendo la siguiente: (1) de 0-5%, corresponde a un agua sin riesgo; (2) de 5.1-14%, a un riesgo bajo; (3) de 14.1-35%, a un riesgo medio; (4) de 35.1-80%, a un riesgo alto; y (5) de 80.1-100%, a un agua inviable sanitariamente.

El IRCA fue estimado con los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos después de la filtración y los microbiológicos después de la desinfección; adicionalmente se calculó el IRCA del agua sin tratamiento (agua cruda) en las dos pruebas realizadas para compararlos con el estimado con base al tratamiento descentralizado propuesto. Los valores de los parámetros medidos y del cálculo del IRCA se muestran en la Tabla 12, donde la codificación representada por las letras hace referencia a la combinación entre coagulantes, filtros y técnica desinfección. [MBFS]: Moringa-bioarena-SODIS; [MFBUV]: Moringa-bioarena-radiación UV; [MFCAS]: Moringa-carbón activado-SODIS; [MFCAUV]: Moringa-carbón activado-radiación UV; [CFBS]: Cañandonga-bioarena-SODIS; [CFBUV]: Cañandonga-bioarena-radiación UV; [CFCAS]: Cañandonga-carbón activado-SODIS; [CFCAUV]: Cañandonga-carbón activado-radiación UV; [SFBS]: Sin coagulantes-bioarena-SODIS; [SFBUV]: Sin coagulantes-bioarena-radiación UV; [SFCAS]: Sin coagulantes-carbón activado-SODIS; [SFCAUV]: Sin coagulantes-carbón activado-radiación UV; [AC]: Agua cruda (sin tratamiento); y [LP]: Límite permisible establecido en la Resolución 2115/2007.

Tabla 12. Estimación del IRCA con los parámetros de calidad de agua analizados en las pruebas de laboratorio

Parámetro		MFBS	MFBUV	MFCAS	MFCAUV	CFBS	CFBUV	CFCAS	CFCAUV	SFBS	SFBUV	SFCAS	SFCAUV	AC	LP
Primera Prueba	pH	7.04	7.04	6.85	6.85	6.65	6.65	7.02	7.02	6.93	6.93	7.1	7.1	7.12	6.5-9
	Color (UPC)	12.95	12.95	11.65	11.65	13.81	13.81	13.3	13.3	16.3*	16.3*	14.2	14.2	375*	15
	Turbiedad (NTU)	7.7*	7.7*	6.9*	6.9*	9.1*	9.1*	8.8*	8.8*	11.2*	11.2*	10.2*	10.2*	645*	2
	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	57.62	57.62	54.41	54.41	52.98	52.98	61.47	61.47	63.92	63.92	59.64	59.64	65.4	200
	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	315*	315*	307.6*	307.6*	324.4*	324.4*	318*	318*	322.4*	322.4*	324.6*	324.6*	357.8*	300
	Cloruros (mg/L Cl ⁻)	42.54	42.54	49.63	49.63	35.45	35.45	42.54	42.54	28.38	28.38	35.45	35.45	61.68	250
	Sulfatos (mg/L)	35	35	26	26	57	57	52	52	46	46	41	41	58	250
	Nitratos (mg/L)	1.9	1.9	1.5	1.5	2.1	2.1	1.8	1.8	2.1	2.1	1.9	1.9	2.1	10
	Coliformes totales (UFC/100 ml)	57*	43*	51*	33*	71*	45*	55*	51*	87*	73*	78*	65*	12100*	0
IRCA (%)		72.94	72.94	72.94	72.94	72.94	72.94	72.94	72.94	87.06	87.06	72.94	72.94	87.06	N/A
Parámetro		MFBS	MFBUV	MFCAS	MFCAUV	CFBS	CFBUV	CFCAS	CFCAUV	SFBS	SFBUV	SFCAS	SFCAUV	AC	LP
Segunda Prueba	pH	7.39	7.39	7.49	7.49	7.3	7.3	7.31	7.31	7.41	7.41	7.4	7.4	7.43	6.5-9
	Color (UPC)	13.15	13.15	11.73	11.73	14.42	14.42	13.04	13.04	16.76*	16.76*	13.88	13.88	388.7*	15
	Turbiedad (NTU)	8.1*	8.1*	7.5*	7.5*	10.2*	10.2*	7.9*	7.9*	11.7*	11.7*	10.6*	10.6*	662*	2
	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	46.8	46.8	48.3	48.3	50.8	50.8	52.8	52.8	52.8	52.8	52.7	52.7	52.8	200
	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	293.8	293.8	289.3	289.3	302.1*	302.1*	286.2	286.2	295.4	295.4	303.4*	303.4*	330.8*	300
	Cloruros (mg/L Cl ⁻)	35.27	35.27	31.9	31.9	32.36	32.36	29.45	29.45	42.54	42.54	39.43	39.43	42.54	250
	Sulfatos (mg/L)	57	57	48	48	56	56	41	41	57	57	53	53	57	250
	Nitratos (mg/L)	1.1	1.1	0.9	0.9	1.2	1.2	1.1	1.1	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	10
	Coliformes totales (UFC/100 ml)	73*	56*	58*	41*	92*	79*	82*	71*	95*	84*	86*	93*	13700*	0
IRCA (%)		70.59	70.59	70.59	70.59	72.94	72.94	70.59	70.59	84.71	84.71	72.94	72.94	87.06	N/A

[*]: Incumple el nivel permisible definido en la Resolución 2115/2007

[N/A]: No aplica

Con base a las estimaciones de los IRCA's mostradas en la tabla anterior, puede observarse que el agua cruda tuvo un IRCA de 87.06% en los dos muestreos realizados, correspondiendo a un agua inviable sanitariamente (80.1-100%) según la clasificación de riesgo sanitario del agua de consumo definido en la Resolución 2115/2007; mientras que en el primer muestreo en todas las combinaciones de tratamiento de agua tuvieron un valor de 72.94% estando dentro del rango de riesgo alto (35.1-80%) de acuerdo al mismo criterio de la mencionada normativa, excepto a dos combinaciones de tratamiento: sin coagulantes-bioarena-SODIS y sin coagulantes-bioarena-radiación UV, en los que valor de IRCA fue igual al del agua cruda (sin tratamiento). Estas dos combinaciones de procesos de tratamiento se mantuvieron en el mismo rango de nivel de riesgo en la segunda prueba, con un valor del IRCA de 84.71%; mientras que en los demás tratamientos se obtuvieron valores de este índice de 70.59% y de 72.94%, correspondiendo a un nivel de riesgo alto.

Teniendo en cuenta que con los tratamientos propuestos se logró reducir el nivel de riesgo de un agua inviable sanitariamente a uno de riesgo alto, el agua de consumo de los pueblos palafíticos con el tratamiento desarrollado en este trabajo sigue constituyendo un riesgo para la salud de los habitantes de estas comunidades de estudio. Sin embargo, debe seguirse trabajando en la mejora de estas técnicas de tratamiento de agua potable, que permitan reducir las concentraciones de los parámetros más importantes del agua de la fuente superficial de los pueblos palafíticos (caño Aguas Negras), que fueron básicamente turbiedad y coliformes totales, ya que cumpliendo con los niveles de aceptación de estos dos parámetros se garantizaría un agua de riesgo bajo a sin riesgo de acuerdo a la Resolución 2115/2007.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo de este trabajo, se concluye y recomienda lo siguiente:

- ✓ La eficiencia de la Moringa en las dosis aplicadas (dosis de 50, 100, 150 y 250 mg/L) fue mayor a la de la Cañandonga (dosis de 10, 15, 20 y 25 mg/L), siendo la dosis óptima de 150 mg/L con una remoción promedio de 96% y 92% de turbiedad y color, respectivamente, frente a la de Cañandonga cuya dosis óptima fue de 25 mg/L con un promedio de 69% y 56% de turbiedad y color, respectivamente. Por otro lado, estas concentraciones óptimas no alteraron el pH de agua, encontrándose dentro del rango permisible de calidad de agua potable definido en la Resolución colombiana 2115/2007.
- ✓ Teniendo en cuenta que la dosis óptima de la Cañandonga fue la mayor concentración aplicada (25 mg/L) al agua cruda procedente de la fuente superficial estudiada, se recomienda que en futuras investigaciones se prueben concentraciones mayores a las del rango utilizadas para este coagulante; lo cual podría aumentar la eficiencia en la remoción del material suspendido del agua mejorando la calidad del agua en el proceso de coagulación.
- ✓ Por otra parte, el menor valor de turbiedad fue de 6.9 UNT y el mayor de 11.7 UNT luego de la filtración mediante los dos filtros empleados (de carbón activado y de bioarena), sobrepasando la normatividad colombiana vigente de este parámetro, que establece como límite permisible 2 UNT. Adicionalmente, al comparar el rendimiento entre los filtros, mediante el test de ANOVA o de Kruskal-Wallis, se determinó que los promedios los valores finales de los parámetros: turbiedad, color, dureza total, coliformes totales y fecales no fueron diferentes, por lo que se pudo concluir que ambos filtros tuvieron la misma eficiencia de remoción con un nivel de confianza del 95%.
- ✓ En cuanto las técnicas de SODIS y radiación UV, se encontró que los coliformes totales y fecales estuvieron por debajo de 100UFC/100mL y de 20UFC/100ml, respectivamente, lo que representa una remoción de

aproximadamente el 99% en ambos casos en comparación con la muestra inicial (agua cruda).

A pesar de las altas remociones de acuerdo a los parámetros analizados, el agua tratada no se considera potable según la normatividad colombiana, pero estas eficiencias podrían reducir el riesgo de enfermedades por el consumo de agua contaminada en los dos pueblos palafíticos estudiados (Nueva Venecia y Buenavista), pero para confirmar dicha hipótesis se recomienda realizar un estudio que permita aplicar las técnicas descritas en este estudio y evaluar la incidencia sobre las enfermedades diarreicas en la población de aplicación.

Se analizó el índice IRCA para las aguas tratadas en esta investigación y se observó que no se redujo significativamente, puesto que pasó de un nivel de agua inviable sanitariamente a un nivel de riesgo alto, lo que es insuficiente para que el agua sea potable 100 %. Pero si sirvió para verificar la reducción del riesgo sanitario real dado que las remociones de los parámetros más importantes (turbiedad, color y coliformes totales y fecales) fueron muy altas en comparación a la del agua cruda inicial, lo que indica que se podría reducir el riesgo sanitario del agua de consumo de estos dos pueblos.

Por otra parte, se sugiere que para posteriores trabajos se utilicen filtros cuyos lechos de arena estén definidos con diámetros de partículas estandarizados como el propuesto por CAWST (2009), ya que se ha sido una referencia mundial mostrando elevadas eficiencias de los parámetros color y turbiedad, lo cual podría optimizar el proceso de filtración y garantizar un agua que cumpla con los niveles estipulados normativamente. Es importante aclarar que este tipo de arena es muy costoso en el país y por ende no se utilizó para esta investigación.

Para facilitar los procesos de desinfección no convencional estudiados (SODIS y radiación UV), se necesita un agua clara, puesto que la eficiencia en la eliminación de microorganismos patógenos depende básicamente del grado de clarificación del agua, por esto se recomienda para futuras investigaciones usar un sistema de filtración con tela para reducir las partículas más grandes y mejorar la eficiencia en la desinfección.

Se recomienda evaluar el rendimiento en la remoción de contaminantes variando las profundidades de lecho de arena, así como los diámetros de partículas de arena, para verificar si el filtro mejora su eficiencia en la remoción de material particulado fino.

Para mejorar el proceso de filtración, se recomienda evaluar otros modelos comerciales de lámparas UV para seleccionar mediante un análisis de diseño experimental, aquella que tenga mayor rendimiento en la eliminación de microorganismos patógenos del agua de consumo de los habitantes de los pueblos palafíticos estudiados.

Finalmente, dada las costumbres y al bajo nivel educativo de las personas que habitan en Nueva Venecia y Buenavista, se requiere de gestión de manera constante e integrada por parte de la comunidad académica, instituciones gubernamentales y fundaciones que permitan la aplicación de este tipo de técnicas sencillas de purificación de agua y crear cátedras de agua limpia para que los habitantes puedan conocer a fondo el tratamiento llevado a cabo en esta investigación.

10.REFERENCIAS

- Antov, M., Šćiban, M., & Prodanović, J. (2012). Evaluation of the efficiency of naturalcoagulant obtained by ultrafiltration of common bean seed extract in waterturbidity removal. *Ecol. Eng*, 49, 48-52.
- APHA, AWWA, WPCF. (1995). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Washington.
- Arango, Á. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 61-66.
- Arboleda , J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (Vol. II). Bogotá: McGraw-Hill.
- Arjona, S., Torres, P., Cruz, C., Loaiza, D., & Escobar, J. (2012). Efecto del punto de precloración sobre la formación de Trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua. *Rev. Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), 57-66.
- Arriaza, A., Waight, S., Contreras, C., Ruano, A., López, A., & Ortiz, D. (2015). Determinación bacteriológica de la calidad del agua para consumo humano obtenida de filtros ubicados dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. *Revista Científica*, 25(2), 21-29.
- Asif, M., Nadeem , R., Nadeem, M., Nawaz, H., & Nawas, R. (2008). Physico-chemical treatment of textile wastewater using natural coagulant Cassia Fistula (Goldem shower) Pod Biomass. *J.Chem.Soc.Pak*, 30(3), 385-393.
- Asprilla, Y., Martínez, M., & Mora, L. (2013). Aspectos técnicos, operativos y ambientales en los sistemas de abastecimiento de agua potable en municipios con nivel de complejidad medio. Un estudio de caso. *Rev. Tecnogestión*, 10(1), 3-11.

- Asrafuzzaman, M., Fakhuruddin, A., & Alamgir, M. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *Int. Scholarly Res. Network*, Article ID 632189. 6p.
- Awrajaw, D., Esayas, A., Seblework, M., Worku, L., Helmut, K., & Argaw, A. (2014). Solar disinfection: an approach for low-cost household water treatment technology in Southwestern Ethiopia. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(25), 1-6.
- Babu, R., & Chaudhuri, M. (2005). Home water treatment by direct filtration with natural coagulant. *Journal of Water and Health*, 3, 27-30.
- Baird , C., & Cann, M. (2014). *Química Ambiental* (Segunda ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Betatache, H., Aouabed, A., Drouiche, N., & Lounici, H. (2014). Conditioning of sewage sludge by prickly pear cactus (*Opuntia ficus Indica*) juice. *Ecol. Eng.*, 70, 465–469.
- Boyle, M., Sichel , C., Fernández, P., Arias, G., Iriarte, M., Mercado, A., . . . McGuigan, K. (2008). Bactericidal Effect of Solar Water Disinfection under Real Sunlight Conditions. *Appl Environ Microbiol*, 74(10), 2997–3001.
- Brownell, M., Harwood, V., Kurz, R., McQuaig, S., Lukasikc, J., & Scott, T. (2007). Confirmation of putative stormwater impact on wáter quality at a Florida beach by microbial source tracking methods and structure of indicator organism populations. *Water Research*, 41, 3747 – 3757.
- Cancio, E., Narváez, J., & Blanco, J. (2006). Dinámica poblacional del coroncoro *Micropogonias furnieri* (Pisces: Sciaenidae) en la Ciénaga Grande de Santa Marta,. *Bol Invest Mar Cost*, 35, 37-58.
- CAWST-Centre for Affordable Water and Sanitation Technology. (2009). *Biosand Filter. Manual for Design, Construction, Installation and Maintenance*. Calgary: CAWST.

- CEP-Banco de la República. (2011). *La economía de las ciénagas del Caribe colombiano* (Primera ed.). Bogotá.
- CEPIS/OPS-Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2001). *BVSDE*. Recuperado el 23 de Marzo de 2017, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo5.pdf>
- Choy, S., Nagendra, K., Yeong, T., Eshwaraiah, M., & Nagasundara, R. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26, 2178 – 2189.
- Choy, S., Prasad, K., Wu, T., Raghunandan, M., & Ramanan, R. (2016). Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal. *Ecological Engineering*, 94, 352–364.
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*(29), 153-170.
- Conesa, V. (2003). *Guía metodológica para la evaluación del Impacto Ambiental* (Tercera ed.). Barcelona: Aedos, s.a.
- Cruz, G., Guzmán, V., Rimaycuna, J., Alfaro, R., Cruz, J., Aguirre, D., & Ubillus, E. (2015). Tratamiento complementario de agua potable utilizando un filtro de carbón activado impregnado con quitosano producidos a partir de biomasa residual. *Manglar*, 12(1), 65-74.
- Cruz, R., Arévalo, H., Chamorro, F., & Fernández, F. (2005). Efecto del uso de un método artesanal para el tratamiento de agua en comunidades rurales de la Región San Martín, Perú. *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publica*, 22(2), 117-122.
- D'Alessio, M., El-Swaify, G., Yoneyama, B., & Ray, C. (2016). A low-cost water-treatment system for potable water supplies in developing countries and after a natural disaster: ability to remove total coliforms and E. coli. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(3), 925–934.

- Dizer, H., Grutzmacher, G., Bartel, H., Wiese, H., Szewzyk, R., & Lopez, J. (2004). Contribution of the Colmation Layer to the Elimination of Coliphages by Slow Sand Filtration. *Water Science and Technology*, 50(2), 211-214.
- Durán, J., & Rodríguez, A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Rev. Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad*, 12(36), 129-162.
- Elliott, M., Stauber, C., Koksai, F., DiGiano, F., & Sobsey, M. (2008). Reductions of E. coli, Echovirus Type 12 and Bacteriophages in an Intermittently Operated HouseholdScale Slow Sand Filter. *Water Research*, 42(10-11), 2662-2670.
- Elmaksoud, S., Naranjo, J., & Gerba, C. (2013). Assessment of a Portable Handheld UV Light Device for the Disinfection of Viruses and Bacteria in Water. *Food and Environmental Virology*, 5(2), 87–90.
- Fabiszewski, A., Stauber, C., Walters, A., Meza, R., & Sobsey, M. (2012). A Randomized Controlled Trial of the Plastic-Housing BioSand Filter and Its Impact on Diarrheal Disease in Copan, Honduras. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 86(6), 913–921.
- Feria, J., Bermúdez, S., & Estrada, A. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. *Producción+Limpia*, 9(1), 9-22.
- Flaten, T. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Res. Bull.*, 55(2), 187–196.
- Fombuena, M., & Valentín, A. (2010). *Manual del carbón activo*. Sevilla: Aguapedia.
- Fuentes, L., Mendoza, I., Díaz, P., Fernández, Y., Zambrano, Á., & Villegas, Z. (2012). POtencial coagulante de la Tuna Opuntia Cochinellifera (L.) Mill. (Cactaceae) en aguas para consumo humano. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 46(2), 173 - 187.

- Garay , J., Restrepo, J., Casas, O., Solano, O., & Newmark, F. (2004). *Los Manglares de la Ecorregión CGSM: pasado, presente y futuro*. Santa Marta: INVEMAR-Serie de publicaciones generales.
- García, B., Arnal, J., & Sancho, M. (2015). Uso de coagulantes naturales para la potabilización del agua en países en vías de desarrollo. En *ADSIDEO-COOPERACIÓN. Experiencias de investigación para el desarrollo humano* (págs. 145-162). Universitat Politècnica de Valencia: Valencia.
- García, B., Rivera, F., Arnal, J., & Sancho, M. (2014). Diseño de una planta de potabilización para comunidades rurales utilizando el compuesto coagulante de la semilla de Moringa Oleífera. *18th International Congress on Project Management and Engineering*, (págs. 1799-1810). Alcañiz.
- Garrido, I., Fernández, R., & Storaci, V. (2013). Evaluación del método “SODIS” en la desinfección del agua para abastecimiento en La Guadalupe, Chirgua, municipio Bejuma del estado Carabobo. *Revista Ingeniería UC*, 20(2), 29-38.
- Gauvreau, D. (2000). Aluminum forms in drinking water and risk of Alzheimer's disease. *Environ. Res.*, 84(3), 234–246.
- Gomez, B., Cui, Y., Kettner, A., Peacock, D., & Syvitski, J. (2009). Simulating changes to the sediment transport regime of the Waipaoa River, New Zealand, driven by climate change in the twenty-first century. *Global and Planetary Change*, 67, 153–166.
- González, M., Viernhes, M., & Sánchez, Á. (2009). La radiación ultravioleta. Su efecto dañino y consecuencias para la salud humana. *Theoria*, 18(2), 69-80.
- Gruber, J., Reygadas, F., Arnold, B., Ray, I., Nelson, K., & Colford, j. (2013). Stepped Wedge, Cluster-Randomized Trial of a Household UV-Disinfection and Safe Storage Drinking Water Intervention in Rural Baja California Sur, Mexico. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 89(2), 238-245.

- Guchi, E., Leta, S., & Boelee, E. (2014). Efficiency of slow sand filtration in removing bacteria and turbidity from drinking water in rural communities of central Ethiopia. *African Journal of Microbiology Research*, 8.
- Guest, R., Schang, C., Deletic, A., & McCarthy, D. (2011). Development of Novel Activated Carbon Filter Media for Pathogen Removal from Stormwater. *12th International Conference on Urban Drainage*, (págs. 1-8). Porto Alegre.
- Gutierrez, J., Cassassuce, F., Martinez, L., De Aquino, J., Hernandez, J., Schlie, M., & Vidal, J. (2014). Evaluation of A Point-Of Use Water Purification System (Llaveoz) in a Rural Setting of Chiapas, Mexico. *J Microbiol Exp*, 1(3), 1-6.
- Guzmán, L., Taron, A., & Núñez, A. (2015). Polvo de la semilla Cassia fistula como coagulante natural en el tratamiento de agua cruda. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 123-129.
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una revisión. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 16(1), 253-262.
- Halperin, M., Paz, V., Quispe, V., Paxton, A., & Gilman, R. (2011). Sustainability of Solar Disinfection to Provide Safe Drinking Water in Rural Peru. *Public Health Rep*, 126(5), 762–768.
- He, Y., Wang, F., Mu, X., Guo, L., Gao, P., & Zhao, G. (2016). Human activity and climate variability impacts on sediment discharge and runoff in the Yellow River of China. *Theor Appl Climatol*. doi:DOI 10.1007/s00704-016-1796-8
- Heaselgrave, W., & Kilvington, S. (2010). Antimicrobial Activity of Simulated Solar Disinfection against Bacterial, Fungal, and Protozoan Pathogens and Its Enhancement by Riboflavin. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(17), 6010–6012.
- Hernández, B., Mendoza, I., Salamanca, M., Fuentes, L., & Caldera, Y. (2013). Semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante en aguas con alta turbiedad. *Redieluz*, 3(1 y 2), 91-96.

- Herrero, A., Buendía, C., Bussi, G., Sabater, S., Vericat, D., Palau, A., & Batalla, R. (2017). Modeling the sedimentary response of a large Pyrenean basin to global change. *J Soils Sediments*. doi:DOI 10.1007/s11368-017-1684-6
- Jodi, M., Birnin, U., Yahaya, Y., & Sokoto, M. (2012). The use of some plants in water purification. *Global Adv. Res. J. Chem. Mater. Sci.*, 1(4), 71–75.
- Juárez, M., Poma, H., & Rajal, V. (2015). ¿Cumplir con la legislación nos garantiza consumir agua segura? *Rev.Iberoamericana del Agua*, 2, 71–79.
- Kukic, D., Sciban, M., Prodanovic, J., Tepic, A., & Vasic, M. (2015). Extracts of fava bean (*Vicia faba* L.) seeds as natural coagulants. *Ecological Engineering*, 84, 229–232.
- Lédo, P., Lima, R., Paulo, J., & Duarte, M. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillas de Moringa oleifera para la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad. *Información Tecnológica*, 20(5), 3-12.
- Lluíz, J. (2008). La problemática del agua potable. *Medicina Naturista*, 2(2), 69-75.
- Marrero, A., Tudurí, A., Pérez, L., Cuña, C., Muniz, P., Lopes, R., . . . García, F. (2014). Cambios históricos en el aporte terrígeno de la cuenca del Río de la Plata sobre la plataforma interna uruguaya. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), 165-179.
- Mäusezah, D., Christen, A., Duran, G., Alvarez, F., Iriarte, M., Zapata, M., . . . Colford, J. (2009). Solar Drinking Water Disinfection (SODIS) to Reduce Childhood Diarrhoea in Rural Bolivia: A Cluster-Randomized, Controlled Trial. *PLoS Med*, 6(8), 1-13.
- Mayorga, J., & Mayorga, O. (2015). Nota técnica: Caracterización del agua de consumo en el sector Santa Rosa-La Hechicera (Mérida, Venezuela). *Revista Ingeniería UC*, 22(2), 106-112.
- McGuigan, K., Conroy, R., Joachim, H., du Preez, M., Ubomba, E., & Fernandez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 29–46.

- McGuigan, K., Joyce, T., & Conroy, R. (1999). Solar disinfection: use of sunlight to decontaminate drinking water in developing countries. *J Med Microbiol*, 48(9), 785-7.
- Méndez, R., Pacheco, J., Castillo, E., Cabrera, A., Vázquez, E., & Cabañas, D. (2015). Calidad microbiológica de pozos de abastecimiento de agua potable en Yucatán, México. *Ingeniería*, 19(1), 51-61.
- Moreno, P., Ibáñez, O., & Rodríguez, A. (2015). Retos sobre la problemática del abastecimiento de agua potable a nivel mundial, nacional y en Ciudad Juárez. *Rev. CULCyT*, 12(56), 61-68.
- Muñoz, M., Orrego, L., Muñoz, D., Lozano, C., Guzman, D., Escobar, M., . . . Ruiz, R. (2014). Efecto microbicida de la radiación solar (SODIS) combinado con *Artemisia annua*. *DYNA*, 81(184), 71-76.
- Mwabi, J., Mamba, B., & Momba, M. (2012). Removal of *Escherichia coli* and Faecal Coliforms from Surface Water and Groundwater by Household Water Treatment Devices/Systems: A Sustainable Solution for Improving Water Quality in Rural Communities of the Southern African Development Community Region. *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, 9(1), 139–170.
- Narváez, S., Gómez, M., & Acosta, J. (2008). Coliformes termotolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Acta biol. Colomb.*, 13(3), 113-122.
- Okuda, T., Baes, W., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation y characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Research*, 35, 405-410.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Genève, Suiza. Recuperado el 16 de Mayo de 2017, de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- OMS. (Junio de 2015). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

- Ospina, O., García, G., Gordillo, J., & Tovar, K. (2015). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 12(19), 19-36.
- Panyapinyopol, B., Marhaba, T., Kanokkantapong, V., & Pavasant, P. (2005). Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water. *Journal of Hazardous Materials*, 120(1-3), 229-236.
- Peláez, D., Guzmán, B., Rodríguez, J., Acero, F., & Nava, G. (2016). Presencia de virus entéricos en muestras de agua para el consumo humano en Colombia: desafíos de los sistemas de abastecimiento. *Biomédica*, 36(2), 169-178.
- Pereira, F., Serrão, V., Bergamasco, R., & Ribau, M. (2017). The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 313, 226–237.
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., & O'Neill, J. (2010). A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water purification. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 791–797.
- Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J., & Kululanga, G. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 799–805.
- Ramírez, H., & Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Rev. Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153.
- Ramírez, L., Suárez, J., & Ramírez, J. (2011). Evaluación de las propiedades floculantes de *Malvaviscus arboreus*, *Heliocarpus popayanensis* e *Hylocereus undatus* para clarificación de aguas. *RIAA*, 2(2), 33-42.
- Ratnoji, S., & Singh, N. (2014). A study of coconut shell - activated carbon for filtration and its comparison with sand filtration. *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering*, 2(3), 201-204.
- Raza, S., Rehman, A., Hussain, F., Nasir, A., & Chand, K. (2015). Design of a slow sand bed filtration system for purification of canal water. *QUEST*, 14-18.

- Restrepo, J., & Escobar, H. (2016). Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.013>
- Rodríguez, E. (2016). La problemática del agua en Nicaragua. *Rev. REICE*, 4(7), 261-285.
- Rodríguez, Y., De la Cruz, G., López, W., Ricaurte, L., & Morales, M. (2015). Uso de un polímero natural (quitosano) como coagulante durante el tratamiento de agua para consumo. *INGENIARE*, 11(19), 25-32.
- Rojas, J. A. (2015). *Purificación del agua* (Tercera ed.). (C. S. Perdomo, Ed.) Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. Recuperado el 18 de Abril de 2016
- Sandoval, M., & Laines, J. (2013). Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. *Ingeniería*, 17(2), 93-101.
- Sanghi, R., Bhattacharya, B., & Singh, V. (2002). Cassia angustifolia seed gum as an effective natural coagulant for decolourisation of dye solutions. *Green Chem*, 4, 252-254.
- Schreiber, C., Rechenburg, A., Rind, E., & Kistemann, T. (2015). The impact of land use on microbial surface water pollution. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218, 181-187.
- Segalla, B., Soares, M., Romero, L., & Sens, M. (2015). Comparison of backwashing with conventional cleaning methods in slow sand filters for small-scale communities. *Desalination and Water Treatment*, 54, 1-7.
- Siew-Leng, L., Fane, A., Krantz, W., & Lim, T. (2012). Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. *Water Research*, 46(10), 3125–3151.
- Silva, E., Villarreal, M., Cárdenas, O., Cristancho, C., Murillo, C., Salgado, M., & Nava, G. (2015). Inspección preliminar de algunas características de

- toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, 2012. *Biomédica*, 35(2), 152-166.
- Siong, Y., Idris, J., & Mazar, M. (2013). Performance of activated carbon in water filters. *Water Resources*, 1-19.
- Stauber, C., Printy, E., McCarty, F., Liang, K., & Sobsey, M. (2012). Cluster Randomized Controlled Trial of the Plastic BioSand Water Filter in Cambodia. *Environ. Sci. Technol.*, 46(2), 722–728.
- Tang, Q., He, X., Bao, Y., Zhang, X., Guo, F., & Zhu, H. (2012). Determining the relative contributions of climate change and multiple human activities to variations of sediment regime in the Minjiang River, China. *Hydrol. Process.* doi:DOI: 10.1002/hyp.9472
- Timothy, F., Matthew, S., Cachro, V., & Muñoz, A. (2014). The effect of increasing grain size in biosand water filters in combination with ultraviolet disinfection. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 4(2), 206-213.
- Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Rev. Ion*, 27(1), 17-34.
- Villabona, Á., Paz, I., & Martínez, J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, 15(1), 137-144.
- Villanueva, C., Kogevinas, M., & Grimalt, J. (2001). Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga. *Rev. Gac. Sanit.*, 15(1), 48-53.
- WHO. (2002). *Managing Water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved Water Supply*. Geneva. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/WSH02.07.pdf
- WHO/UNICEF. (2015). *Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment*. Recuperado el 13 de Julio de 2016, de

http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/177752/1/9789241509145_eng.pdf?ua=1

- Yao, W., & Xu, J. (2013). Impact of human activity and climate change on suspended sediment load: the upper Yellow River, China. *Environ Earth Sci*, 70, 1389–1403.
- Yin, C. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochem*, 45, 1437-1444.
- Young, C., & Madramootoo, C. (2014). Intermittent versus continuous operation of biosand filters. *Water Research*, 49, 1-10.
- Zaman, S., Begum, A., Rabbani, K., & Bari, L. (2016). Low cost and sustainable surface water purification methods using moringa seeds and scallop powder followed by bio-sand filtration. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(1).
- Zamora, A., Narváez, J., & Londoño, L. (2007). Evaluación económica de la pesquería artesanal de la Ciénaga Grande de Santa Marta y complejo de pajarales, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 36(1), 33-48.
- Zhao, Y., Zou, X., Gao, J., Xu, X., Wang, C., Tang, D., . . . Wu, X. (2015). Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 536, 803–812.